Mentale Repräsentation negativer Zahlen

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des
Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät I:
Sozialwissenschaften und historische
Kulturwissenschaften
der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

von

Frau Katja Lochmann

geb. am 16. 02. 1981 in Rudolstadt

Gutachter:
PD. Dr. Sven Blankenberger
Prof. Dr. Josef Lukas

Datum der Verteidigung: 23.07. 2010

Ein erreichtes Ziel
ist das Ende eines Weges
und der Anfang eines anderen.

Ernst Ferstl

Danksagung

Zu Dank bin ich vielen Menschen verpflichtet.

Mein größter Dank gebührt meinem Freund, Mentor und Lehrer PD Dr. Sven Blankenberger. Seine fachliche Kompetenz und seine hohen Ansprüche haben in mir wissenschaftlichen Eifer hervorgerufen. In zahlreichen Diskussionen hat er mir Wissen vermittelt, über das nur wenige Menschen verfügen. Er hat mir – manchmal mit Nachdruck – das wissenschaftliche Leben gezeigt und so zu einer wichtigen Entscheidung in meinem Leben beigetragen. Ich danke dir für deine Geduld im Erklären und deine tröstenden Worte in stressigen Zeiten sowie deine Kommentare und Vorschläge, die zu jedem Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit hilfreich waren. Es ist dir gelungen, ein Lehrer und gleichzeitig ein Freund für mich zu sein.

Herrn Prof. Josef Lukas gebührt mein Dank. Ohne seine Hilfe hätte ich weder die Graduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt erhalten, noch die halbe Mitarbeiterstelle am Institut für Psychologie in Halle antreten können. Ich danke Ihnen dafür, dass ich ein Mitglied Ihrer Abteilung sein durfte.

Ohne Katrin Bittrich wären einige Entstehungsphasen dieser Arbeit schwieriger gewesen. Sie hat mir den Rücken in stressigen Zeiten frei gehalten und mich durch ihren fortwährenden Zuspruch – sei es durch Taten oder durch Worte – gerade in den letzten Monaten gestärkt. Ihre Kommentare zu einer früheren Version dieser Arbeit haben zu einem qualitativen Zuwachs geführt. Ich danke dir für deine Unterstützung.

Mathias oblag die schwierige Aufgabe, mich am Ende eines Tages und am Wochenende von der Arbeit fernzuhalten. Obgleich ich aktiv Widerstand leistete, ist ihm dies (fast) immer gelungen. Ich danke dir, dass du die Wissenschaftlerin in mir akzeptierst und hoffe, dass du meinen Weg noch lange begleitest.

Meiner lieben Freundin Uta danke ich für den moralischen Beistand während der ganzen Zeit. Sie hat die Höhen und Tiefen miterlebt und mich in zahlreichen Pausen aufgemuntert sowie die Begeisterung in erfolgreichen Phasen geteilt.

Meine fleißigen Korrekturleser Katrin, Uta und René haben mir zur Fertigstellung der Endfassung verholfen. Ich danke euch für die Zeit, die ihr mir trotz eurer Kinder gewidmet habt.

Ich danke auch all denjenigen, die sich in schier endlosen Sitzungen zur Verfügung stellten und deren Daten nachfolgend dargestellt werden.

Schließlich bedanke ich mich bei der Graduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt, durch die mir für zwei Jahre ein Stipendium bewilligt wurde. Außerdem danke ich der Frauenförderung der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ohne deren finanzielle Unterstützung die Suche nach Versuchspersonen weitaus mehr Zeit in Anspruch genommen hätte.

Katja Lochmann im März 2010

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Die Frage nach der mentalen Repräsentation negativer Zahlen stellte die Kernfrage der vorliegenden Arbeit dar. Es existiert gute empirische Evidenz dafür, dass einstelligen positiven Zahlen analogartige mentale Größenrepräsentationen in Form einer *mental number line* zugrunde liegen (z. B. Banks, Fujii & Kayra-Stuart, 1976; Moyer & Landauer, 1967). Davon ausgehend wurden für die mentale Repräsentation negativer Zahlen zwei konkurrierende Annahmen formuliert. Mit der *Zahlenstrahlannahme* wird die Existenz eines mentalen Zahlenstrahls angenommen, der eine Ausweitung in den positiven und negativen Zahlenbereich aufweist. Alternativ besagt die *Strategieannahme*, dass der numerische Vergleich negativer Zahlen auf der mentalen Repräsentation positiver Zahlen beruht und zur Generierung der korrekten Antwort entsprechende Strategien zum Einsatz kommen müssen. Hierzu wurde die Strategie der Reaktionsumkehr von der Strategie der Instruktionsumkehr abgegrenzt. Zur Untersuchung der Fragestellung dienten zahlreiche Effekte, die beim numerischen Vergleich von negativen bzw. positiven Zahlen auftreten. Der SNARC-Effekt bildete die Grundlage der Experimente 1 und 2. Entgegen des kontinuierlichen SNARC-Effekts, der in Experimenten mit Paritätsurteilen gefunden wird (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993), wies der SNARC-Effekt beim numerischen Vergleich von positiven und negativen Vergleichszahlen mit der Standardzahl −5 bzw. 5 eine kategoriale Form auf. Dieser kategoriale Zusammenhang ergab sich auch beim numerischen Vergleich ausschließlich positiver Zahlen mit der Standardzahl 5 (Exp. 3). Dies führte zur Formulierung eines Modells, dass neben der räumlich-numerischen Assoziation von einer natürlichen Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' ausgeht. Erste empirische Evidenz für die postulierte natürliche Assoziation lieferte Experiment 4. In Experiment 5 wurde der Größenkongruenzeffekt untersucht, der bei negativen und positiven Zahlenpaaren entgegengesetzte Ausprägungen aufwies. Somit bestätigte die für das numerische Urteil entscheidende absolute numerische Größe die Gültigkeit der Strategieannahme. Mit der Annahme der mentalen Repräsentation der absoluten numerischen Größe einer negativen Zahl und einer daraus resultierenden Interferenz mit der zu beurteilenden numerischen Größe, konnte die Existenz einer eigenständigen mentalen Größenrepräsentation negativer Zahlen dennoch beibehalten werden (*Interferenzannahme*). Die Hypothese, die Strategien könnten in Form einer verbalisierten Selbstinstruktion angewendet werden, erfuhr weder in Experiment 6 noch in Experiment 8 empirische Unterstützung. In Experiment 6 verschwand der Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren, wofür die konstante Instruktion sowie der Verzicht der Präsentation gemischter Zahlenpaare verantwortlich zu sein schien (Exp. 7). Die Wiederherstellung des Reaktionszeitunterschiedes gelang in Experiment 8 durch die Variation der Instruktion. Lediglich die Strategie der Instruktionsumkehr eignete sich, das Auftreten bzw. Nicht-Auftreten des Reaktionszeitunterschiedes zu erklären. Darüber hinaus bestätigte der semantische Kongruenzeffekt sowohl in Experiment 6 als auch in Experiment 8 die Anwendung der Strategie der Instruktionsumkehr. Die Ergebnisse deuten insgesamt betrachtet darauf hin, dass zur Beurteilung der numerischen Größe negativer Zahlen die Strategie der Instruktionsumkehr zur Anwendung kommt. Versuchspersonen bestimmen zur korrekten Auswahl der numerisch größeren (kleineren) zweier negativer Zahlen die absolut kleinere (größere) Zahl. Aus diesem Grund muss die Annahme eines negativen mentalen Zahlenstrahls abgelehnt werden.

1 Einleitung

Der Umgang mit negativen Zahlen wird in der Schule meist ab der 6. oder 7. Klasse gelehrt. Bei deren Einführung wird häufig auf die Analogie zu Temperaturen oder Haben und Soll auf dem Konto zurückgegriffen. Im Alltag bereitet uns der Umgang mit negativen Zahlen selten Probleme. Wir können ohne Weiteres angeben, dass es sich bei einer Temperaturveränderung von −9 °C auf −2 °C um einen Anstieg handelt. Uns gelingt die Beurteilung, dass nach der Tilgung von Schulden in Höhe von 8,– € weniger Geld zur Verfügung steht als nach der Tilgung von 1,– € Schulden. Dennoch stellt gerade diese Analogie für viele Kinder ein Problem dar, wie die Aussage von Peter verdeutlichen soll: „Wenn ich 5 Euro Schulden habe, habe ich mehr Schulden, als wenn ich 3 Euro Schulden habe. Somit ist −5 größer als −3.“ (Malle, 1996, S. 145).

Im Gegensatz dazu gelingt der Vergleich zweier positiver Zahlen i. d. R. problemlos. Doch auch Erwachsene zögern kurz, bevor sie der Aussage „Die Zahl −7 ist numerisch kleiner als die Zahl −3“ zustimmen. Auf der Suche nach einer Antwort auf die Frage, wodurch die Probleme im Umgang mit negativen Zahlen entstehen, muss man sehr schnell feststellen, dass der numerische Vergleich negativer Zahlen in der Forschung kaum Berücksichtigung findet.

Die vorliegende Arbeit soll diese Lücke schließen. Es wird sich mit der Frage beschäftigt, wie man zu der Antwort gelangt, dass −7 numerisch kleiner als −3 ist. Die zentrale Fragestellung stellt die Charakterisierung der mentalen Größenrepräsentation negativer Zahlen dar, auf die für diesen numerischen Vergleich zugegriffen werden muss. Deshalb kommt in allen Experimenten das Paradigma des numerischen Vergleiches zur Anwendung, in welchem aus zwei präsentierten Zahlen die numerisch kleinere bzw. größere ausgewählt werden soll. Zahlreiche Effekte beim numerischen Vergleich positiver und negativer Zahlen sollen Aufschluss über deren zugrunde liegende mentale Repräsentation geben. Bevor jedoch die wenigen experimentellen Arbeiten zu diesem Thema vorgestellt und diskutiert werden, erfolgt eine ausführliche Charakterisierung der mentalen Repräsentation positiver Zahlen.

2 Theoretischer Teil

2.1 Effekte beim numerischen Vergleich

In einem 1967 in der Fachzeitschrift *Nature* publizierten Artikel präsentierten Moyer und Landauer Ergebnisse einer einfachen Selektionsaufgabe. Aus zwei gleichzeitig dargebotenen einstelligen Zahlen sollte jeweils per Tastendruck die numerisch größere Zahl bestimmt werden. Die linke und rechte Zahl des Zahlenpaares lag jeweils im Bereich $[1, \ldots, 9]$, Zahlenpaare mit zwei gleichen Elementen (z. B. 5 5) waren nicht im Stimulusmaterial enthalten. Die Autoren fanden, dass die Versuchspersonen schneller auf zwei Zahlen mit einer großen numerischen Differenz (z. B. $d = 7$ für 2 9) als auf zwei Zahlen mit einer kleinen numerischen Differenz (z. B. $d = 1$ für 3 4) reagieren konnten. Diese Abhängigkeit der Reaktionszeit von der numerischen Differenz ging als *numerischer Distanzeffekt* in die Literatur ein und erfuhr seitdem vielfache Replikation (z. B. Banks, Fujii & Kayra-Stuart, 1976; Schwarz & Ischebeck, 2000). Die Robustheit des numerischen Distanzeffekts wird anhand der Daten von Poltrock (1989) deutlich. Dieser ließ seine Versuchspersonen über 24 Sitzungen mit insgesamt knapp 25 000 Beobachtungen numerische Vergleiche durchführen. Zwar verringerte sich der Einfluss der numerischen Differenz über den Verlauf der Sitzungen, blieb aber auch mit dieser enormen Durchgangsanzahl bestehen. Der numerische Distanzeffekt tritt auch dann auf, wenn man zu Beginn des Experiments eine Standardzahl (z. B. 5) vorgibt und einzeln präsentierte Zahlen danach klassifizieren lässt, ob sie numerisch kleiner oder größer als die Standardzahl sind (z. B. Schwarz & Heinze, 1998; Schwarz & Ischebeck, 2003; Tzelgov, Meyer & Henik, 1992). Der Effekt konnte bei zweistelligen (Dehaene, Dupoux & Mehler, 1990; Hinrichs, Yurko & Hu, 1981) und bei Zahlen mit mehr als zwei Stellen (Hinrichs, Berie & Mosell, 1982) gezeigt werden. Des Weiteren trat der Effekt beim Vergleich der Anzahl von Punkten in einem Punktmuster (Buckley & Gillman, 1974) und beim Vergleich der Größe von Tieren (Moyer, 1973; Rubinsten & Henik, 2002) auf. Handelt es sich, wie in der Untersuchung von Moyer (1973), um nicht-numerisches Material, dann wird von einem symbolischen Distanzeffekt gesprochen.

Ein weiterer Effekt beim numerischen Vergleich ist der *numerische Größeneffekt* (Banks et al., 1976; Schwarz & Stein, 1998). Betrachtet man die Reaktionszeiten für eine konstante numerische Differenz, so nehmen diese mit Ansteigen der numerischen Größe der beiden Zahlen zu. In Abbildung 2.1 sind Daten aus einem numerischen Vergleichsexperiment von Lochmann (2005) dargestellt, die u. a. Zahlenpaare mit Zahlen im Bereich $[1, \ldots, 9]$ präsentierte. Abbildung 2.1 gibt die Ergebnisse für drei ausgewählte numerische Differenzen wieder. Der numerische Distanzeffekt äußert sich in längeren Reaktionszeiten für Zahlenpaare mit einer kleinen numerischen Differenz ($d = 1$) im Vergleich zu Zahlenpaaren mit einer größeren numerischen Differenz von $d = 3$ oder *d* = 5. Betrachtet man hingegen die Reaktionszeiten für die kleinere Zahl des Zahlenpaares pro numerischer Differenz, so wird der numerische Größeneffekt ersichtlich: Je größer die beiden Zahlen eines Zahlenpaares sind, desto größer sind die Reaktionszeiten. In einigen Untersuchungen wird der Begriff Minimum-Effekt verwendet, wenn der Zusammenhang zwischen der kleineren Zahl des Zahlenpaares und der Reaktionszeit ohne Berücksichtigung der numerischen Differenz betrachtet wird (Buckley & Gillman, 1974; Parkman, 1971).

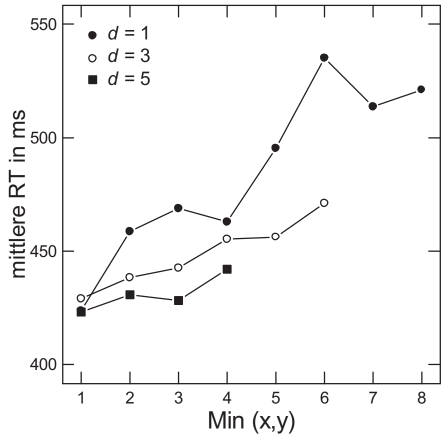


Abbildung 2.1. Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der kleineren Zahl eines Zahlenpaares für die numerischen Differenzen *d* = 1, *d* = 3 und *d* = 5, Abbildung in Anlehnung an Lochmann (2005).

In den bisher genannten Experimenten bestand die Aufgabe der Versuchsperson in jedem Durchgang darin, die numerisch größere Zahl per Tastendruck zu bestimmen. Alternativ kann man die Versuchsperson auch die numerisch kleinere Zahl des Zahlenpaares auswählen lassen. Diese Variation der Instruktion führt den semantischen Kongruenzeffekt zutage. Dieser besagt, dass aus zwei numerisch kleinen Zahlen (z. B. 1 2) schneller die numerisch kleinere im Vergleich zur numerisch größeren Zahl ausgewählt werden kann. Umgekehrt kann bei Präsentation zweier numerisch großer Zahlen (z. B. 9 8) schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl" im Vergleich zu „Wähle die numerisch kleinere Zahl" reagiert werden (Banks et al., 1976; Duncan & McFarland, 1980). Banks und Flora (1977) sowie Jamieson und Petrusic (1975) konnten den semantischen Kongruenzeffekt zudem bei Größenvergleichen von Tieren und Gegenständen in Bild- und Wortform zeigen. Link (1990) wies den Effekt auch für den numerischen Vergleich zweistelliger Zahlen nach. Interessanterweise tritt der semantische Kongruenzeffekt auch dann auf, wenn die Versuchspersonen entscheiden sollen, welches von zwei Tieren das intelligentere bzw. weniger intelligente Tier ist. Versuchspersonen im Experiment 2 von Banks und Flora sollten Tiere (Affe, Hund, Huhn, Fisch etc.) zunächst entsprechend ihrer Intelligenz in eine Rangreihe bringen. Die befragten Personen schrieben einem Affen mehr Intelligenz als einem Hund zu. Hingegen schätzen die Personen einen Hund im Vergleich zu einem Fisch oder einem Huhn als das intelligentere Tier ein. Dem Fisch wiederum wurde weniger Intelligenz als einem Huhn zugesprochen. In einem zweiten Schritt bekamen (andere) Versuchspersonen jeweils Tierpaare präsentiert. Vor jedem Durchgang gab der Versuchsleiter verbal an, ob bei dem nachfolgenden Tierpaar das klügere (*choose smarter*) oder dümmere Tier (*choose dumber*) ausgewählt werden sollte. Es zeigte sich, dass aus zwei klugen Tieren (Affe-Hund) schneller das klügere im Vergleich zum dümmeren Tier ausgewählt wurde. Hingegen wählten die Versuchspersonen aus zwei als weniger klug eingeschätzten Tieren (z. B. Fisch-Huhn) schneller das (noch) weniger kluge Tier aus.

2.2 Mentale Zahlrepräsentation

2.2.1 Der mentale Zahlenstrahl

Die geschilderten Effekte führen zu der Frage, auf welche Weise numerische Größen mental repräsentiert werden. Würden Zahlen auf einer symbolischen Ebene verglichen und demzufolge propositional repräsentiert werden, dann dürften numerische Distanz- und Größeneffekte nicht auftreten. Die Vorhersage der numerischen Distanz- und Größeneffekte ist jedoch durch die Annahme einer Repräsentation mit analogartigem Charakter gegeben. Laut Steiner (1988) sind analoge mentale Repräsentationen „Abbildungen, die die Eigenschaften (oder zumindest einige von ihnen) eines abzubildenden Objekts oder Umweltereignisses beibehalten, Abbildungen also, die in einer bestimmten Weise den äußeren Gegebenheiten ähnlich sind“ (S. 99). Rehkaemper (1995) formulierte diesen Sachverhalt ähnlich: „Eine analoge Repräsentation wird verstanden als das Ergebnis einer Struktur erhaltenden Abbildung, die intrinsisch die inhärenten Eigenschaften der Dimensionen und Relationen des Originals erhält“ (S. 63). Bei Annahme einer analogartigen mentalen Größenrepräsentation sollten die Eigenschaften der numerischen Größe in den Eigenschaften der mentalen Größenrepräsentation abgebildet werden. Beispielsweise sind sich die Zahlen 2 und 3 hinsichtlich ihrer numerischen Größen ähnlicher als die Zahlen 2 und 8. Diese Eigenschaft sollte sich auch in den zugehörigen mentalen Repräsentationen widerspiegeln, was sich auf behavioraler Ebene anhand der Reaktionszeiten für numerische Urteile feststellen lässt. Da die Reaktionszeiten tatsächlich von der numerischen Differenz beeinflusst werden, kann bei positiven Zahlen von einer analogartigen mentalen Größenrepräsentation ausgegangen werden.

Bereits Moyer und Landauer (1967) schlussfolgerten aus ihren Ergebnissen, dass numerische Größen im mentalen System analogartig repräsentiert sind. Demzufolge werden die Zahlen in analogartige mentale Größenrepräsentationen transformiert, auf deren Basis dann der Vergleich stattfindet. Restle (1970) prägte den Begriff des mentalen Zahlenstrahls, der fortan als metaphorische Beschreibung der numerischen Größenrepräsentation verwendet wurde. Zahlreiche Eigenschaften dieses mentalen Zahlenstrahls sollen in den folgenden Abschnitten näher beleuchtet werden. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die nicht-lineare Komprimierung sowie die räumlich-numerische Assoziation gerichtet.

2.2.2 Nicht-lineare Komprimierung

Objektiv gesehen liegen die Zahlen 2 und 3 nicht weiter auseinander als die Zahlen 8 und 9; beide Zahlenpaare haben eine numerische Differenz von $d = 1$. Der numerische Größeneffekt besagt aber gerade, dass die Reaktionszeiten für die numerische Beurteilung des letzteren Zahlenpaares größer sind. Zur Erklärung des numerischen Größeneffekts sowie des numerischen Distanzeffekts wird angenommen, dass die den numerischen Größen zugrunde liegenden mentalen Repräsentationen eine gewisse Ungenauigkeit besitzen, die mit steigender numerischer Größe zunimmt. Für die Entstehung dieser Ungenauigkeit schlagen Gallistel und Gelman (1992) sowie Dehaene (1992) unterschiedliche Ansätze vor.

Gallistel und Gelman (1992, 2000) postulieren in ihrem linearen Modell mit skalarer Variabilität, dass die numerischen Größenrepräsentationen einer Variabilität unterliegen, die dem Weberschen Gesetz folgt. Demzufolge erscheint dieselbe objektive numerische Differenz subjektiv kleiner, je größer die Zahlen sind, die diese numerische Differenz erzeugen. Dazu wird angenommen, dass jede mentale Größenrepräsentation eine Aktivierungsverteilung besitzt, deren Erwartungswert dem Wert der korrespondierenden numerischen Größe entspricht. Die Standardabweichung dieser Aktivierungsverteilung nimmt laut Modell proportional zur mittleren numerischen Größe zu. Gibbon (1977; zit. nach Gallistel & Gelman, 1992) bezeichnet diese Eigenschaft als skalare Variabilität: Je größer die Standardabweichung einer Aktivierungsverteilung ist, desto ungenauer ist die mentale Größenrepräsentation. Der obere Teil von Abbildung 2.2 verdeutlicht diese Annahme. Die Abstände zwischen den Erwartungswerten zweier aufeinander folgender mentaler Repräsentationen sind gleich. Jedoch steigt mit Zunahme der numerischen Größe die Breite der Aktivierungsverteilung der zugehörigen Repräsentation an, wodurch sich die Aktivierungsverteilungen zweier benachbarter Repräsentationen immer stärker überlappen. Durch diese Überlappung wird die Zuordnung, zu welcher Aktivierungsverteilung ein Signal gehört mit zunehmender numerischer Größe erschwert, was erhöhte Reaktionszeiten zur Folge hat.

Dehaene (1992) geht wie auch Gallistel und Gelman (1992, 2000) davon aus, dass die numerischen Größenrepräsentationen dem Weberschen Gesetz folgen und merkt an, dass dieser Zusammenhang durch ein lineares Modell mit skalarer Variabilität zustande kommen kann. Er präferiert jedoch einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen der objektiven numerischen Größe und der korrespondierenden subjektiven mentalen Größenrepräsentation und schlägt hierfür eine logarithmische Funktion oder eine Potenzfunktion vor (siehe Abbildung 2.2, unten). Dehaenes Vorstellung der numerischen Größenrepräsentation lautet: „Our brain represents quantities in a fashion not unlike the logarithmic scale on a slide ruler, where equal space is allocated to the interval between 1 and 2, between 2 and 4, and between 4 and 8“ (S. 76).

Legt man dem Modell eine Logarithmusfunktion zugrunde und betrachtet erneut die Aktivierungs-

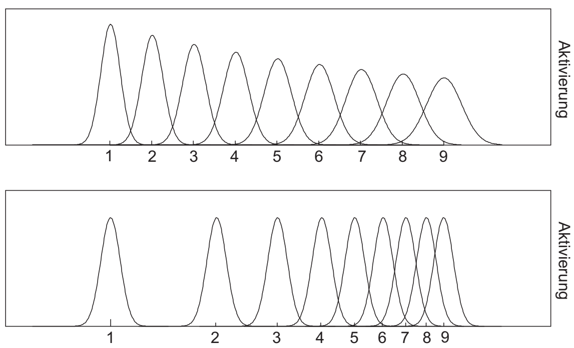


Abbildung 2.2. Der mentale Zahlenstrahl. Oben: Annahme der linearen Anordnung mit skalarer Variabilität nach Gallistel und Gelman (1992). Unten: Annahme der nicht-linearen Komprimierung nach Dehaene (1992).

verteilung für jede numerische Größe, so ergeben sich konstante Standardabweichungen der logarithmierten Werte. Die logarithmische Komprimierung hat zur Folge, dass die Abstände zwischen den Größenrepräsentationen mit Zunahme der numerischen Größe immer kleiner werden. Dadurch ergibt sich für die Repräsentationen großer numerischer Größen eine stärkere Überlappung der Aktivierungsfunktionen als für die Repräsentationen kleiner numerischer Größen. Wie auch im Modell von Gallistel und Gelman (1992) erschwert diese zunehmende Überlappung die Unterscheidung zwischen benachbarten Größenrepräsentationen; dies äußert sich in erhöhten Reaktionszeiten (Feigenson, Dehaene & Spelke, 2004).

Die Ergebnisse zum numerischen Distanzeffekt bzw. numerischen Größeneffekt können sowohl mit dem Modell von Dehaene (1992) als auch mit dem Modell von Gallistel und Gelman (1992) erklärt werden. Über die Gültigkeit eines der beiden Modelle kann somit auf Grundlage der beiden Effekte nicht entschieden werden. Im Folgenden werden deshalb experimentelle Befunde berichtet und diskutiert, die als Beleg für das jeweilige Modell gelten.

Mit der Skalierung des mentalen Zahlenstrahls beschäftigte man sich schon seit den 70er Jahren. Beispielsweise bekamen die Versuchspersonen in den Experimenten von Banks und Hill (1974, Exp. 1–3) die Aufgabe, *n* zufällige Zahlen zu produzieren. Die untere Zahlengrenze wurde auf den Wert 1 festgesetzt, eine obere Grenze wurde hingegen nicht vorgegeben. Die drei Experimente unterschieden sich dahingehend, wie viele produzierte Zahlen in die Analyse aufgenommen wurden bzw. wie den Versuchspersonen die Aufgabe vermittelt wurde. Beispielsweise sollten sich die Versuchspersonen von Experiment 3 vorstellen, sie seien eine „Zufallszahlen-Generierungsmaschine“. In allen drei Experimenten konnte die Verteilung der produzierten Zahlen eindeutig durch eine nicht-lineare Funktion (Potenzfunktion mit Exponent 0.67) beschrieben werden. Im Bereich 1–1 000 wurden deutlich mehr kleine als große Zahlen genannt, was als Beleg für eine Komprimierung des mentalen numerischen Kontinuums angesehen wurde.

Eine völlig andere Methode verwendeten Schneider, Parker, Ostrosky und Kanow (1974). Die Autoren erstellten zwei Zahlensets mit je zehn Zahlen im Bereich $[17, \ldots, 312]$. Im linearen Zahlenset waren die Zahlen gleichmäßig über den Zahlenbereich verteilt. Im logarithmischen Zahlenset wurden mehr kleine als große Zahlen ausgewählt. Für jedes Zahlenset wurden alle 45 möglichen (geordneten) Zahlenpaare gebildet, pro Durchgang wurde eines dieser Zahlenpaare präsentiert. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, die Ähnlichkeit der beiden Zahlen eines Zahlenpaares auf einer Skala von 1 (= „sehr unähnlich“) bis 9 (= “sehr ähnlich“) einzuschätzen. Aus den 45 Ähnlichkeitsurteilen wurde mittels nicht-metrischer Skalierung für jede Zahl des Zahlensets ein Projektionswert geschätzt. Gegen die Zahlen der Zahlensets abgetragen, konnten die Projektionswerte beider Zahlensets am besten durch eine nicht-lineare Funktion (Potenzfunktion mit Exponent 0.75) beschrieben werden.

Im Experiment von Buckley und Gillman (1974) wurden jeweils zwei Reize nebeneinander präsentiert, entweder zwei Zahlen oder zwei Punktmuster. Die Versuchspersonen wurden instruiert, die numerisch größere Zahl bzw. das Punktmuster, das mehr Punkte enthält, auszuwählen. Die verwendeten numerischen Größen lagen im Bereich 1–9. Neben dem gewöhnlichen numerischen Distanzeffekt entstand der Minimum-Effekt, die Ergebnismuster für die beiden Reizarten unterschieden sich geringfügig. Die Autoren verwendeten das Verfahren der nicht-metrischen multidimensionalen Skalierung, um damit Rückschlüsse auf die subjektive Ähnlichkeit der Reize (numerischen Größen) zu ziehen. Das Verfahren lieferte eine zweidimensionale Lösung. Neben der Dimension numerische Größe ergab sich eine zweite Dimension, welche die Autoren auf die Reizart (Zahlen vs. Punktmuster) zurückführten. Entscheidend ist jedoch die Anordnung der numerischen Größen in dieser zweidimensionalen Lösung, die einer logarithmierten Skala entsprach.

Die Modellierung der Reaktionszeiten zahlreicher Experimente zum Paradigma des numerischen Vergleiches liefert eine zusätzliche Möglichkeit zur Entscheidung für eines der beiden konkurrierenden Modelle. Einige Autoren berichten für die $\log D$-Gleichung

$$RT = a + b \cdot \log(Z_{max} - Z_{min}) \tag{2.1}$$

eine zufriedenstellende Anpassungsgüte (Dehaene et al., 1990; Hinrichs et al., 1981). Die Konstanten a und b stellen zu schätzende Parameter dar, Z_{max} und Z_{min} stehen für die größere bzw. kleinere Zahl des Zahlenpaares. Das Ergebnismuster des numerischen Distanzeffekts kann mit dieser Gleichung sehr gut modelliert werden. Da jedoch nur die Differenz der beiden Zahlen – unabhängig von deren numerischer Größe – Berücksichtigung findet, scheitert die $\log D$-Gleichung an der Vorhersage des numerischen Größeneffekts.

Zur Modellierung der Reaktionszeiten des numerischen Vergleichsparadigmas wird deshalb häufig die Welford-Gleichung nach Welford (1960)

$$RT = a + b \cdot \log \frac{Z_{max}}{Z_{max} - Z_{min}} \tag{2.2}$$

verwendet. In zahlreichen Untersuchungen lieferte diese Gleichung eine gute Datenanpassung (Dehaene et al., 1990; Hinrichs et al., 1981; Moyer & Landauer, 1967). Dehaene (1997) führt die Welford-Gleichung als Beleg für das Modell der nicht-linearen Komprimierung an. Obwohl darin Werte logarithmiert werden, muss dieser Behauptung jedoch widersprochen werden. Nach Umformung der Gleichung 2.2 erhält man

$$RT = a + b \cdot [\log Z_{max} - \log(Z_{max} - Z_{min})]. \tag{2.3}$$

Daran ist leicht zu erkennen, dass die Reaktionszeit eine lineare Funktion der Differenz aus logarithmierter größerer Zahl und logarithmierter numerischer Differenz ist. Der Term $\log Z_{max}$ würde gut mit dem Modell der nicht-linearen Komprimierung im Einklang stehen. Hingegen wird im Term $\log(Z_{max} - Z_{min})$ eine Differenz logarithmiert. Diese Differenzberechnung basiert jedoch auf einer linearen Skala, was am ehesten mit dem linearen Modell der skalaren Variabilität vereinbar ist. Würde hingegen das Modell der nicht-linearen Komprimierung gelten, so stellt sich die Frage, weshalb für den zweiten Term nicht die Differenz der logarithmierten Werte, $\log Z_{max} - \log Z_{min}$, betrachtet wird. Dies wurde von Dehaene (1989) für den numerischen Vergleich zweistelliger Zahlen mit der Standardzahl 75 vorgeschlagen (siehe Abschnitt 2.2.5). Allerdings unterschied sich die Varianzaufklärung einer Regression mit dem Prädiktorterm $\log|V - S|$ (mit V als Vergleichszahl und S als Standardzahl) nicht von der Varianzaufklärung einer Regression mit dem Prädiktorterm $\log|\log V - \log S|$[1].

Obgleich die bisher berichteten Befunde auf die Gültigkeit der nicht-linearen Komprimierung des mentalen Zahlenstrahls hinweisen, existieren zahlreiche Befunde, die als Beleg für das lineare

[1] Laut Dehaene (1989) sollte der erste Logarithmus die Nicht-Linearität des numerischen Distanzeffekts und der zweite Logarithmus das Fechnersche Gesetz modellieren.

Modell mit skalarer Variabilität gewertet werden können. Zu diesen zählt ein Experiment von Siegler und Opfer (2003), in welchem Kinder der 2., 4. und 6. Klasse sowie Studienanfänger untersucht wurden. Die Autoren präsentierten ihren Versuchsteilnehmern auf einem Blatt Papier einen 25 cm langen Zahlenstrahl, dessen Anfang und Ende entweder mit den Zahlen 0 und 100 oder den Zahlen 0 und 1 000 beschriftet war. Alle Teilnehmer mussten zwei Aufgaben bearbeiten. In der *number-to-position* Aufgabe (N-P-Aufgabe) wurde eine Zahl vorgegeben, deren Position auf dem Zahlenstrahl eingezeichnet werden sollte. Umgekehrt sollte in der *position-to-number* Aufgabe (P-N-Aufgabe) einer auf dem Zahlenstrahl eingezeichneten Position ein numerischer Wert zugeordnet werden. Pro Aufgabe und Zahlenintervall wurden je fünf Zahlen, z. B. 4, 6, 18, 71, 230 und 780 verwendet. Die Autoren fanden alters- sowie aufgabenabhängige Effekte. Im Zahlenintervall 1–1 000 konnten die Daten der Zweitklässler in der N-P-Aufgabe am besten durch eine logarithmische Funktion und in der P-N-Aufgabe am besten durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden. Für Viertklässler ergaben sich zwischen logarithmischer vs. linearer Funktion in der N-P-Aufgabe und zwischen Exponential- und linearer Funktion in der P-N-Aufgabe keine Unterschiede. Im Zahlenintervall 1–100 konnte für die N-P-Aufgabe für Zweit- und Viertklässler mit einer linearen Gleichung die bessere Anpassungsgüte erzielt werden. Hingegen produzierten Sechstklässler sowie Studierende in beiden Aufgaben Daten, die eindeutig einen linearen Zusammenhang aufwiesen. Die Autoren schlussfolgern, dass Kinder über multiple Größenrepräsentationen (linear, logarithmisch oder exponentiell) verfügen und diese in unterschiedlichen Kontexten anwenden. Entgegen dieser Schlussfolgerung sprechen die logarithmischen bzw. exponentiellen Zusammenhänge sogar dafür, dass es sich um ein und dieselbe Repräsentation handelt. Die N-P-Aufgabe kann als Umkehrung der P-N-Aufgabe aufgefasst werden. Damit muss die bessere Passung der Logarithmusfunktion in der einen Aufgabe mit der besseren Passung ihrer Umkehrfunktion (Exponentialfunktion) in der anderen Aufgabe einhergehen. Die linearen Zusammenhänge der älteren Kinder und Erwachsenen interpretierten Siegler und Opfer als Beleg für das lineare Modell mit skalarer Variabilität. Die Autoren schränken diese Interpretation jedoch dadurch ein, indem sie die Möglichkeit der Verwendung von Strategien anführen. So könnten die Versuchspersonen auf dem vorgelegten Zahlenstrahl Referenzpunkte (z. B. die Mitte des Zahlenstrahls als Referenzpunkt für 50 bzw. 500) gesetzt haben, um die präsentierte Zahl zu positionieren bzw. einer vorgegebenen Position eine Zahl zuzuordnen. Da die Daten für diese Strategieanwendung sprechen, stellt sich die Frage, ob damit noch die intendierte Größenrepräsentation und daraus abgeleitete lineare Form des mentalen Zahlenstrahls untersucht wird oder eher die Fähigkeit, einen Bereich mental in eine bestimmte Anzahl an Intervallen zu unterteilen.

Gallistel und Gelman (1992, 2000) führen stets die Ergebnisse der Arbeiten von Platt und Johnson (1971) sowie Whalen, Gallistel und Gelman (1999) als empirische Unterstützung ihres Modells an. Im Experiment von Platt und Johnson lernten Ratten, für den Erhalt von Futter einen Hebel N-mal zu drücken. In der Testphase wurde die Anzahl der Hebeldrücke für den Erhalt eines Futterpellets mit $N = 4, 8, 12$ oder 24 blockweise variiert. Die abhängige Variable bildete die Anzahl der Hebeldrücke, bis die Ratte das Hebeldrücken unterbrach, weil sie ihr Köpfchen in den Futterbehälter steckte. Trat diese Reaktion auf, bevor die geforderte Anzahl N erreicht war, wurde der Zähler auf Null gesetzt und die Futterbelohnung blieb aus. Zeigte das Versuchstier hingegen das geforderte Verhalten und bediente den Hebel N-mal (oder häufiger), erhielt es eine Futterpille. Abbildung 2.3 gibt die Verteilung der Antworten pro gefordertem N wieder. Auffällig ist, dass das Maximum der Verteilungen in allen vier Bedingungen größer als die geforderte Anzahl

N ist. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die Belohnung auch dann erfolgte, wenn eine Hebeldruck-Anzahl größer N produziert wurde. Weiterhin geht aus der Abbildung hervor, dass die Anzahl der Hebeldrücke pro gefordertem N mit einer Variabilität einherging. Diese Variabilität der Reaktion, gemessen an der Standardabweichung, nahm mit der geforderten Anzahl N zu. Allerdings blieb der Variationskoeffizient, der das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert wiedergibt, über alle vier Bedingungen konstant.

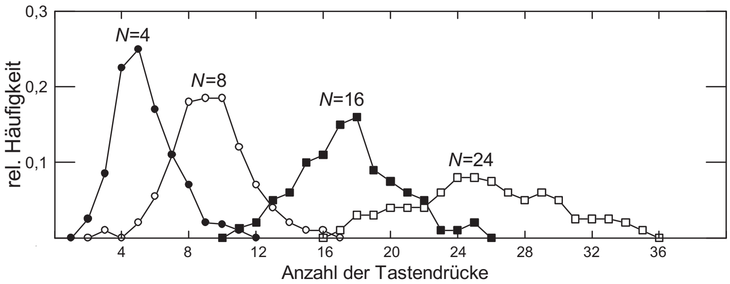


Abbildung 2.3. Relative Häufigkeit der Hebeldrücke bis zur Unterbrechung in Abhängigkeit von der geforderten Hebeldruck-Anzahl N, Abbildung in Anlehnung an Platt und Johnson (1971).

Dieser experimentelle Ansatz wurde im Experiment von Whalen et al. (1999) auf Versuchspersonen übertragen. Im sog. *key-press* Experiment sollten die Versuchspersonen so schnell wie möglich eine Taste so oft nacheinander drücken, wie es eine ihnen präsentierte Zahl angab. Die geforderte Anzahl an Tastendrücken konnte (ungerade) Werte im Bereich 7–25 annehmen. Die Ergebnisse gleichen denen von Platt und Johnson (1971). Die produzierte Anzahl an Tastendrücken entsprach im Mittel der geforderten Anzahl. Allerdings variierte die Standardabweichung der produzierten Tastendrücke systematisch: Die Streuung nahm umso größere Werte an, je größer die geforderte Anzahl war. Dabei blieben die Variationskoeffizienten über alle Bedingungen konstant. Um die mögliche Strategie des Zählens der Tastendrücke auszuschließen, führten die Autoren ein zweites Experiment, das sog. *flash-count* Experiment, durch. Der Name des Experiments deutet schon an, worin die Aufgabe der Versuchsperson bestand. Sie sahen eine Lampe, die in einem Durchgang N-mal ($N = 7, \ldots, 25$) aufblinkte und waren aufgefordert, die Anzahl dieser *flashs* zu benennen. Einer möglichen Konfundierung zwischen Anzahl des Aufblinkens und Präsentationszeit wurde durch die Variation der Dauer der *flashs* und der Variation der Inter-Stimulus-Intervalle (ISI) vorgebeugt. Wie auch schon im ersten Experiment ergab sich eine lineare Abhängigkeit der geschätzten Anzahl der *flashs* von der tatsächlichen Anzahl der *flashs*, wobei die Standardabweichung systematisch mit der Größe der *flash*-Anzahl zunahm. Die Variationskoeffizienten der einzelnen Bedingungen variierten hingegen nicht mit der Anzahl der präsentierten *flashs*. Dies veranlasste die Autoren zur Schlussfolgerung, dass der mentalen Repräsentation der numerischen Größe ein lineares Modell mit skalarer Variabilität zugrunde liegt.

Auch wenn die Ergebnisse von Platt und Johnson (1971) sowie Whalen et al. (1999) zunächst als Belege für das Modell von Gallistel und Gelman (1992, 2000) gewertet werden könnten, sprechen mehrere Kritikpunkte dagegen. Erstens wurden die Daten beider Experimente nie auf die Gültigkeit des nicht-linearen Modells überprüft. Zweitens verdeutlichen die Ergebnisse von Krueger (1982), dass mit einer ähnlichen Aufgabe auch beim Menschen nicht-lineare Zusammenhänge gefunden werden. Jede seiner 800 Versuchspersonen absolvierte nur einen Durchgang. In diesem wurde ein Punktmuster mit 25, 35, 50, 75, 100, 150, 200 oder 300 Punkten für max. 5 s präsentiert und die Versuchsperson sollte die Anzahl der Punkte schätzen. Die Auswertung dieser Schätzungen ergab eine Potenzfunktion der Art $Y = k \cdot X^{0.83}$, wobei Y die geschätzte und X die tatsächliche Anzahl der Punkte des Punktmusters darstellt. Interessanterweise nahmen auch die Standardabweichungen der Schätzungen mit der Anzahl der Punkte zu.

Der dritte Kritikpunkt bezieht sich auf die durchgeführte Auswertung der Experimente von Platt und Johnson (1971) sowie Whalen et al. (1999) und die Wertung dieser im Sinne des linearen Modells. In beiden Untersuchungen ergab sich zwischen der mittleren produzierten Anzahl und der tatsächlichen Anzahl der Hebeldrücke/Tastendrücke/*flashs* ein linearer Zusammenhang. Die Standardabweichungen nahmen pro geforderter Anzahl zu, wobei die Variationskoeffizienten konstant blieben. Alle drei Datenmerkmale würde man allerdings auch dann erhalten, wenn das nicht-lineare Modell gilt, die Berechnungen von Mittelwert und Standardabweichung jedoch auf einer linearen Skala beruhen. Dem unteren Teil von Abbildung 2.2 könnte beispielsweise die logarithmische Normalverteilung zugrunde liegen (Oeffelen & Vos, 1982). Diese hat die Eigenschaft auf einer logarithmischen Skala die Form einer Normalverteilung anzunehmen, auf einer linearen Skala weist sie hingegen eine asymmetrische, linksgipflige Form auf. Gleichermaßen könnte dem oberen Teil von Abbildung 2.2 die gewöhnliche Normalverteilung zugrunde liegen, die auf einer linearen Skala eine symmetrische, auf einer logarithmischen jedoch eine asymmetrische, rechtsgipflige Form erhält. Betrachtet man nun mehrere Realisierungen beider Verteilungen mit den entsprechenden Modelleigenschaften, so lässt sich zeigen, dass sowohl die Standardabweichung als auch der Variationskoeffizient unbrauchbare Maße für die Überprüfung der Modellgültigkeit sind. Beide Verteilungen führen mit den angenommenen Modelleigenschaften auf einer linearen Skala zu konstanten Variationskoeffizienten. Gleichermaßen erhält man konstante Standardabweichungen (der logarithmierten Werte), wenn man die Verteilungen auf einer logarithmierten Skala darstellt. Die Überprüfung beider Modelle wäre allerdings mit einem Test auf Symmetrie der Verteilungen möglich. In einer bahnbrechenden Untersuchung wendeten Nieder und Miller (2003, s. a. Sawamura, Shima & Tanji, 2002) genau diese Art der Modelltestung an. Die Autoren erhoben an zwei Rhesus-Affen (Macaca mulatta) Verhaltensdaten und leiteten Zellen aus dem lateralen präfrontalen Cortex ab, während diese eine sog. *delayed match-to-numerosity task* ausführten. Zum Start eines Durchgangs mussten die Affen auf einem Bildschirm einen Punkt fixieren sowie einen Hebel ergreifen. Ihnen wurde dann ein Vergleichsreiz mit einer bestimmten Anzahl an Punkten für 800 ms präsentiert. Nach einem Behaltensintervall von 1000 ms wurde für 1200 ms ein Testreiz dargeboten. Der Vergleichsreiz konnte 2–6 Punkte enthalten, der Testreiz hingegen 1–11 Punkte. Die Unterscheidung aufgrund visueller Merkmale (Reizgröße, Reizanordnung, Reizfläche etc.) konnte durch entsprechende Kontrollreize ausgeschlossen werden. Die Affen waren darauf trainiert worden, den Hebel bei Übereinstimmung der Punkteanzahl zwischen Vergleichs- und Testreiz loszulassen und erhielten dafür eine Belohnung (Fruchtsaft). Bei Nicht-Übereinstimmung sollten sie den Hebel weiterhin festhalten. Um die Affen auch nach *non-match* Durchgängen belohnen zu können, wurde nach einem weiteren kurzen Behaltensintervall ein zweiter Testreiz für 1 200 ms dargeboten. Dieser enthielt die gleiche Anzahl an Punkten wie der Vergleichsreiz und nach dem korrekten Loslassen des Hebels erfolgte die Belohnung. In den Verhaltensdaten konnten sich die Autoren die Antwortverteilungen für jede Vergleichsreiz-Punkteanzahl anschauen, d. h. wie oft die Affen den Hebel bei jeder präsentierten Testreiz-Punkteanzahl losließen. Stimmte die Anzahl an Punkten im Vergleichs- und Testreiz überein, antworteten die Affen in über 90 % der Durchgänge korrekt. Je kleiner jedoch die Differenz der Punkteanzahl zwischen Vergleichs- und Testreiz war, desto häufiger ließen die Affen den Hebel fälschlicherweise los (numerischer Distanzeffekt). Dabei ergaben sich mit zunehmender numerischer Größe immer breitere Antwortverteilungen (numerischer Größeneffekt). Der Nachweis des numerischen Distanz- und Größeneffekts gelang auch anhand der neuronalen Daten. Die Autoren identifizierten sog. Anzahl-sensitive Zellen im ventralen Teil des präfrontalen Cortex, die ihre maximale Entladungsrate für eine der präsentierten Punkteanzahlen zeigten. Entscheidend ist, dass die Amplitude der Entladungsraten auf andere Punkteanzahlen systematisch mit der numerischen Differenz zur präferierten Punkteanzahl der Zelle abnahm. Nieder (2006) spricht in diesem Zusammenhang von der „bevorzugten Anzahl eines Neurons" (S. 393). Weitaus bedeutsamer ist jedoch die Überprüfung der Daten hinsichtlich der beiden konkurrierenden Modelle. Zur Beurteilung der Symmetrie der behavioralen Antwortverteilungen wurden die Daten sowohl auf einer linearen Skala als auch auf nicht-linearen Skalen (logarithmisch, Potenzfunktion mit Exponent 0.3, Potenzfunktion mit Exponent 0.5) dargestellt. Die Anpassung einer Normalverteilung lieferte für die nicht-linearen Skalen die beste Anpassungsgüte. Diese symmetrischeren Verteilungen wiesen zusätzlich konstante Standardabweichungen pro Vergleichszahl auf. Erfreulicherweise ließ sich das gleiche Ergebnis auch in den neuronalen Daten nachweisen. Anzahl-sensitive Zellen konnten zudem bei den gleichen Versuchstieren im intraparietalen Sulcus (IPS) gezeigt werden (Nieder & Miller, 2004).

Zahlreiche Studien mit bildgebenden Verfahren deuten darauf hin, dass das horizontale Segment des IPS eine entscheidende Rolle bei der numerischen Größenrepräsentation spielt (für einen Überblick siehe Dehaene, Piazza, Pinel & Cohen, 2003; Hubbard, Piazza, Pinel & Dehaene, 2005). Umso erstaunlicher ist die Übertragung der Befunde von Nieder und Miller (2003) auf den Menschen. Piazza, Izard, Pinel, Bihan und Dehaene (2004) griffen auf die Methode der fMRI-Adaptation zurück. Die Idee dieser Methode ist recht einfach: Die Aufgabe der Versuchsperson besteht darin, sich Abfolgen von Punktmustern anzuschauen. In einem Block wird wiederholt eine konstante Anzahl n_1 in unterschiedlichen Punktmustern gezeigt. Die auf die präsentierte Anzahl reagierenden Neuronen werden zu Beginn eine erhöhte Aktivität zeigen. Mit jeder wiederholten Präsentation werden die Entladungsraten jedoch geringer ausfallen. Nieder (2006) spricht in diesem Zusammenhang vom Habituieren der Neuronen. Wird dann in einem Durchgang eine von n_1 abweichende Anzahl n_2 präsentiert, dann sollte sich die neuronale Antwort erholen. Die Autoren nahmen an, dass der Grad der Aktivierung bei einer abweichenden Anzahl einen Zusammenhang zur numerischen Distanz $n_1 - n_2$ aufweist. Die verwendete Punkteanzahl für die Habituationsreize betrug 16 oder 32. Die abweichenden Punktmuster enthielten 8–32 Punkte beim Habituationsreiz 16 bzw. 16–64 Punkte beim Habituationsreiz 32. Die Autoren analysierten pro Habituationsreiz die Stärke des fMRI-Signals im IPS in Abhängigkeit von den abweichenden Reizen. Die zwei Aktivierungsverteilungen wurden auf einer linearen und einer logarithmischen Skala abgetragen, sodann wurde eine Normalverteilung an die Daten angepasst. Dies führte wie auch schon bei Nieder und Miller zu einer zufriedenstellenden Anpassungsgüte für die nicht-lineare Skalierung.

Die vielen unterschiedlichen experimentellen und methodischen Ansätze deuten darauf hin, dass die Transformation der objektiven numerischen Größe in ihre analogartige Größenrepräsentation einer nicht-linearen Komprimierung unterliegt. Inwieweit die Nicht-Linearität besser durch eine logarithmische Funktion oder eine Potenzfunktionen beschrieben werden kann, müssen zukünftige Untersuchungen klären.

2.2.3 Räumlich-numerische Assoziation

2.2.3.1 Der SNARC-Effekt

Eine zweite Eigenschaft des mentalen Zahlenstrahls ist dessen räumlich-numerische Assoziation, die von Dehaene et al. (1993) auf den Namen SNARC-Effekt (*Spatial-Numerical Association of Response Codes*) getauft wurde. Die Autoren präsentierten einstellige Zahlen, deren Parität per Tastendruck bestimmt werden sollte (Exp. 1). Die entscheidende experimentelle Manipulation bildete die Variation der Antwortseite bzw. Antworthand. Die Versuchspersonen wurden in einem Teil der Blöcke instruiert, bei Präsentation einer ungeraden Zahl die linke und bei Präsentation einer geraden Zahl die rechte von zwei horizontal angeordneten Tasten zu drücken. In einem anderen Teil der Blöcke lautete die Instruktion umgekehrt: Drücke die rechte Taste für ungerade Zahlen und die linke Taste für gerade. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, dass auf kleine Zahlen (z. B. 1, 2) schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand reagiert werden kann, auf große Zahlen (z. B. 8, 9) hingegen schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand.

Zur graphischen Veranschaulichung des SNARC-Effekts wird pro präsentierter Zahl der sog. dRT-Wert verwendet, der die Differenz aus den Reaktionszeiten darstellt, die mit der rechten und linken Antwortseite zustande kommen. Dabei entspricht ein positiver dRT-Wert einer schnelleren Antwort mit der linken Antworthand und ein negativer dRT-Wert einer schnelleren Antwort mit der rechten Antworthand. Trägt man die dRT-Werte gegen die numerischen Größen ab, so äußert sich der SNARC-Effekt in einem negativen Zusammenhang (siehe Abbildung 2.4).

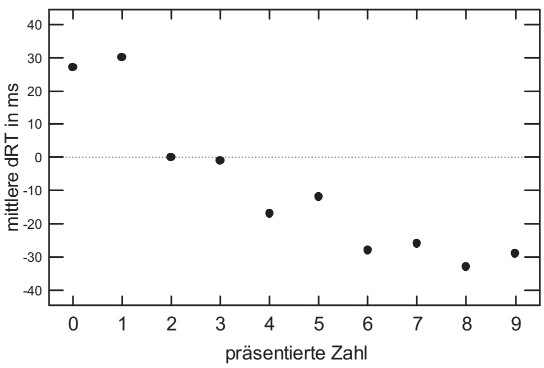


Abbildung 2.4. Der SNARC-Effekt als Differenz der Reaktionszeiten mit der rechten und linken Hand pro präsentierter Zahl, Abbildung in Anlehnung an Dehaene et al. (1993).

Der SNARC-Effekt besagt, dass Zahlen entsprechend ihrer numerischen Größe eher eine Assoziation mit ‚links' oder mit ‚rechts' aufweisen. Diese räumlich-numerische Assoziation wird als Eigenschaft der mentalen Größenrepräsentation aufgefasst. Da die numerische Größe für das Paritätsurteil völlig irrelevant ist, wird der SNARC-Effekt seitdem als Beleg für die automatische Aktivierung der numerischen Größenrepräsentation angesehen. Gleichzeitig entstand aus der Metapher des mentalen Zahlenstrahls die Annahme, dass die numerische Größenrepräsentation tatsächlich einem mentalen Zahlenstrahl gleicht, auf dem die mentalen Größenrepräsentationen kleiner Zahlen links und großer Zahlen rechts angeordnet sind (Fias & Fischer, 2005).

Kaum eine Arbeit im Bereich der numerischen Kognition hat so viel weitere Forschung angeregt wie die von Dehaene et al. (1993). Nach dem Erscheinen der Originalarbeit wurde der SNARC-Effekt nicht nur repliziert (z. B. Gevers, Verguts, Reynvoet, Caessens & Fias, 2006; Schwarz & Keus, 2004), sondern konnte auch mit einer Reihe anderer Versuchsanordnungen gezeigt werden. Ein Beispiel hierfür ist das Experiment zum *phonem-monitoring* von Fias, Brysbaert, Geypens und d'Ydewalle (1996). Niederländische Versuchspersonen sollten für einzeln präsentierte Zahlen im Bereich $[1,\ldots,9]$ jeweils per Tastendruck angeben, ob das Zahlwort das Phonem /e/ enthält[2]. Auch in diesem Experiment ist die numerische Größe für die Entscheidung der Versuchsperson unbedeutend. Dennoch zeigten Fias et al. (1996), dass auf kleine Zahlen schneller mit der linken Hand und auf große Zahlen schneller mit der rechten Hand reagiert werden konnte.

Auf den ersten Blick sprechen die Ergebnisse von Fischer, Castel, Dodd und Pratt (2003) der räumlich-numerischen Eigenschaft der mentalen Größenrepräsentation einen Einfluss zu, der weit über die Assoziation von numerisch kleinen Zahlen mit ‚links' und numerisch großen Zahlen mit ‚rechts' hinausgeht. Die Autoren postulieren, dass allein das Präsentieren einer Zahl eine Verschiebung der räumlichen Aufmerksamkeit nach sich ziehe. In einem Durchgang wurde auf einem schwarzen Bildschirm zwischen zwei ungefüllten weißen Quadraten ein Fixationspunkt für 500 ms präsentiert, der durch eine numerisch kleine Zahl (1 oder 2) oder eine numerisch große Zahl (8 oder 9) ersetzt wurde. Nach einem variablen ISI (50, 100, 200, 300, 400 oder 500 ms) erschien – unabhängig von der numerischen Größe – im linken oder rechten Quadrat ein Zielreiz (weißer Kreis). Die Aufgabe bestand darin, bei Präsentation dieses Zielreizes so schnell wie möglich die Leertaste zu drücken. Ab einem ISI von 400 ms konnte auf den Zielreiz im linken Quadrat schneller reagiert werden, wenn vorher eine numerisch kleine Zahl präsentiert wurde und auf den Zielreiz im rechten Quadrat, wenn vorher eine numerisch große Zahl präsentiert wurde. Die Ergebnisse könnten als Beleg dafür gewertet werden, dass das passive Wahrnehmen einer Zahl deren räumlich-numerische Assoziation automatisch aktiviert und dadurch einen räumlichen Aufmerksamkeitswechsel induziert. Ristic, Wright und Kingstone (2006) wiederholten das Experiment von Fischer et al. (2003). Eine Hälfte der Versuchspersonen erhielt zusätzlich die Aufforderung, sich die präsentierten Zahlen auf einem Zahlenstrahl vorzustellen, auf dem kleine Zahlen rechts und große Zahlen links angeordnet sind. Diese zusätzliche Instruktion führte zu einer Umkehr des Effekts: Nach numerisch kleinen Zahlen konnte schneller auf den rechten Zielreiz, nach numerisch großen Zahlen schneller auf den linken Zielreiz reagiert werden. Dieses Ergebnis spricht gegen die Interpretation einer durch die numerische Größe bedingten räumlichen Aufmerksamkeitsverschiebung und für den Einfluss von *top-down* Prozessen. Zu ähnlichen Ergebnissen und Schlussfolgerungen gelangen auch Galfano, Rusconi und Umiltà (2006).

Der SNARC-Effekt konnte in vergleichbarer Weise mit Augenbewegungen (Fischer, Warlop, Hill & Fias, 2004; Schwarz & Keus, 2004) und mit Zeigebewegungen (auf gerade bzw. ungerade zeigen) nachgewiesen werden. Schwarz und Müller (2006) verglichen den SNARC-Effekt bei Reaktionen mit den Händen und Füßen und fanden identische Anstiege der Regressionsgeraden. Auch Schwarz und Keus (2004) untersuchten den SNARC-Effekt mit unterschiedlichen Effektoren (Hände vs. Augen), wobei in einem Teil der Durchgänge die Antwort per Tastendruck abgege-

[2] Im Niederländischen enthalten die Zahlwörter der Zahlen 1, 2, 6, 7 und 9 das Phonem /e/.

ben werden sollte und in einem anderen Teil die Blickbewegung als abhängige Variable diente. Die Versuchspersonen bekamen die typische SNARC-Aufgabe: Es wurden die Ziffern 0–9 präsentiert, die Aufgabe lautete, den gerade/ungerade-Status der Zahlen zu beurteilen. In Durchgängen, in denen die Augenbewegung erfasst wurde, bestand die Aufgabe darin, so schnell wie möglich auf ein Rechteck am linken (rechten) Bildschirmrand bei Präsentation einer geraden (ungeraden) Zahl zu schauen. Selbstverständlich wurde jeder Versuchsperson auch die umgekehrte Instruktion (links-ungerade und rechts-gerade) gegeben. Als abhängige Variable wurde der Beginn der Sakkade nach links bzw. rechts erfasst. Die Autoren erhielten mit beiden abhängigen Variablen (Reaktionszeiten bzw. Sakkadenbeginn) den typischen SNARC-Effekt. Für die Blickbewegungen bedeutet dies, dass Sakkaden bei numerisch kleinen Zahlen schneller nach links initiiert wurden. Im Gegensatz dazu wurden Blickbewegungen nach rechts schneller bei Präsentation numerisch großer im Vergleich zu numerisch kleinen Zahlen initiiert. Der identische Anstieg der Regressionsgeraden für die Reaktionszeiten und den Sakkadenbeginn stützt die Annahme der Unabhängigkeit des SNARC-Effekts vom verwendeten Effektor.

Aus der Untersuchung von Schwarz und Keus (2004) kann man schlussfolgern, dass der SNARC-Effekt keineswegs das Resultat einer hochgradig überlernten, motorischen Assoziation zwischen kleinen bzw. großen Zahlen und der linken bzw. rechten Antwortseite ist. Schon Dehaene et al. (1993, Exp. 6) konnten diesen Erklärungsansatz mit Hilfe eines Experiments ausschließen, in dem sie ihre Versuchspersonen aufforderten, die Hände während der Antwortabgabe zu überkreuzen. Die Überkreuzung der Hände führt dazu, dass mit der rechten Hand die linke Taste und mit der linken Hand die rechte Taste bedient wird. Der SNARC-Effekt trat dabei unabhängig von der Antworthand auf. Auf numerisch kleine Zahlen konnte schneller reagiert werden, wenn zur Antwortabgabe die linke Taste (mit der rechten Hand) bedient wurde. Die Reaktion auf numerisch große Zahlen erfolgte schneller mit der rechten Taste, obwohl dazu die linke Hand benutzt wurde. Während Dehaene et al. in all ihren Experimenten in der Instruktion die Betonung auf die Tastenzuordnung legten (z. B. „Wenn eine ungerade Zahl präsentiert wird, dann drücke die linke Taste.“), hoben Müller und Schwarz (2007b, Exp. 3) in ihrer Instruktion die Antworthand hervor (z. B. „Wenn eine ungerade Zahl präsentiert wird, dann antworte mit der linken Hand.“). Es zeigte sich erneut, dass der SNARC-Effekt unabhängig von der Antworthand auftrat. Dies bedeutet, dass Zahlen mit dem extrakorporalen Raum assoziiert werden, der durch die Antworttasten vorgegeben wird.

Ein wichtiges Merkmal des SNARC-Effekts ist dessen Kontextabhängigkeit. Für das Auftreten des SNARC-Effekts ist das in einem Block verwendete Zahlenintervall von Bedeutung. Dehaene et al. (1993, Exp. 3) präsentierten in unterschiedlichen Blöcken Zahlen aus einem von zwei Zahlenbereichen (0–5 vs. 4–9), die Versuchspersonen sollten erneut Paritätsurteile abgeben. Im Zahlenbereich $[0,\ldots,5]$ sind 4 und 5 die numerisch größten Zahlen und die Reaktion darauf erfolgte schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand. Wurden allerdings Zahlen im Bereich $[4,\ldots,9]$ präsentiert, dann konnten Versuchspersonen auf die Zahlen 4 und 5 schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand antworten (s. a. Fias et al., 1996).

Baechtold, Baumueller und Brugger (1998) wiesen auf einen weiteren Aspekt der Kontextabhängigkeit hin. Sie präsentierten ihren Versuchspersonen die Zahlen 1 bis 11 (ohne die Zahl 6). Ein Teil der Versuchspersonen sollte sich die Zahlen als Distanzen auf einem Lineal vorstellen (Lineal-Gruppe). Personen der sog. Uhren-Gruppe wurden instruiert, sich die Zahlen als Uhrzeiten auf einer Analoguhr vorzustellen. Beide Gruppen absolvierten zunächst 20 Übungsdurchgänge, in welchen die Ziffern jeweils mit einer schematischen Darstellung eines Lineals bzw. einer Uhr dargeboten wurden. In den Gruppen lautete die Instruktion im ersten Teil der Blöcke die linke Taste zu drücken, wenn die dargebotene Zahl einer Distanz kürzer als 6 cm bzw. einer Uhrzeit früher als 6.00 Uhr entsprach und die rechte Taste zu drücken, wenn die dargebotene Zahl einer Distanz länger als 6 cm bzw. später als 6.00 Uhr entsprach. Im zweiten Teil der Blöcke lautete die Instruktion umgekehrt. Wie erwartet konnte der SNARC-Effekt in der Lineal-Gruppe mit schnelleren linkshändigen Antworten auf Zahlen < 6 und schnelleren rechtshändigen Antworten auf Zahlen > 6 repliziert werden. In der Uhren-Gruppe gab es einen Effekt entsprechend der Anordnung der Zahlen auf dem Ziffernblatt einer Analoguhr: Auf Zahlen < 6 konnte schneller mit der rechten Hand reagiert werden, auf Zahlen > 6 schneller mit der linken Hand. Dies entspricht einem umgekehrten SNARC-Effekt. Allerdings muss man anmerken, dass die mittleren Reaktionszeiten in der Lineal-Gruppe im Vergleich zur Uhren-Gruppe 150–200 ms kürzer waren.

An dieser Stelle muss man sich die Frage stellen, wodurch die links-rechts-Orientierung der Zahlen zustande kommt. Einen möglichen Erklärungsansatz stellt die sequenzielle Anordnung der Zahlen dar, d. h. immer dann wenn die präsentierten Reize eine sequenzielle Reihenfolge aufweisen, wird eine räumliche Assoziation aktiviert. In ihrem vierten Experiment präsentierten Dehaene et al. (1993) in jedem Durchgang einen der Buchstaben A, C, E, G, I, L, O, R, U, X mit der Aufgabe, diese in Vokale und Konsonanten zu klassifizieren. Variiert wurde erneut die Antwortseite (z. B. links für Vokal und rechts für Konsonant). Mit dieser Versuchsanordnung ließ sich kein SNARC-Effekt nachweisen. Allerdings konnten Gevers, Reynvoet und Fias (2003, Exp. 2) dieses Ergebnis nicht replizieren. Die Autoren verwendeten die Buchstaben E, G, I, L, R, U, W, Y und die niederländischen Versuchspersonen sollten nacheinander eine Reihenfolge-relevante und eine Reihenfolge-irrelevante Aufgabe absolvieren. In der Reihenfolge-relevanten Aufgabe galt es zu entscheiden, ob der präsentierte Buchstabe im Alphabet vor oder nach dem Buchstaben „O“ kommt. In der Reihenfolge-irrelevanten Aufgabe sollten die Buchstaben in Vokale und Konsonanten klassifiziert werden[3]. Mit beiden Aufgaben konnte der SNARC-Effekt gezeigt werden, wobei der SNARC-Effekt in der Reihenfolge-irrelevanten Aufgabe im Vergleich zur Reihenfolge-relevanten Aufgabe deutlich kleiner war. Auch unter Verwendung von Monatsnamen (Gevers et al., 2003, Exp. 1) oder Wochentagen (Gevers, Reynvoet & Fias, 2004) konnten ähnliche SNARC-Effekte gezeigt werden. Daraus ließe sich schlussfolgern, dass der SNARC-Effekt weniger durch zahlenspezifische Eigenschaften zustande kommt, sondern durch die sequenzielle Anordnung der Zahlen. Alternativ könnte man zu der Schlussfolgerung gelangen, dass nicht-numerischen Sequenzen (Buchstaben, Wochentage, Monate etc.) und Zahlen ähnliche Verarbeitungsmechanismen zugrunde liegen.

Folgt man Dehaene et al. (1993), so ist der SNARC-Effekt ein Resultat der kulturell bedingten Lese- und Schreibrichtung. Aus diesem Grund würde es in Ländern, in denen von links nach rechts geschrieben wird, eine Assoziation von kleinen Zahlen mit links und großen Zahlen mit rechts geben. Im Umkehrschluss würde man erwarten, dass der SNARC-Effekt bei solchen Menschen in umgekehrter Richtung vorliegt, die von rechts nach links lesen und schreiben (z. B. Iran, Pakistan). Diese Annahme konnte von Dehaene et al. (1993, Exp. 7) mit iranischen Versuchspersonen nur teilweise bestätigt werden. Untersucht wurden Iraner, die zwar im Iran aufgewachsen,

[3]Der Buchstabe Y ist im Niederländischen ein Vokal.

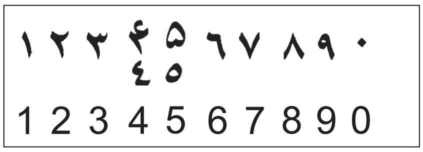


Abbildung 2.5. Die ostarabischen Ziffern, Abbildung in Anlehnung an Ifrah (1991).

jedoch nach Frankreich ausgewandert waren. Die Autoren präsentierten u. a. ostarabische Zahlsymbole[4] (siehe Abbildung 2.5). Gemittelt über alle Versuchspersonen fanden die Autoren keinen Hinweis auf den SNARC-Effekt, was sie auf die Variabilität zwischen den Versuchspersonen zurückführten. So produzierte ein Teil der Versuchspersonen Daten mit SNARC-typischen, negativen Zusammenhängen zwischen den dRT-Werten und den numerischen Größen. Bei anderen Versuchspersonen war dieser Zusammenhang jedoch positiv, auf numerisch kleine Zahlen wurde schneller mit der rechten Antwortseite, auf numerisch große Zahlen schneller mit der linken Antwortseite reagiert. Allerdings ergab sich ein negativer Zusammenhang zwischen der Richtung des SNARC-Effekts und der Aufenthaltsdauer in Frankreich: Je mehr Jahre seit der Immigration nach Frankreich vergangen waren, desto negativer war der SNARC-Zusammenhang. Schwarz und Müller (2006) kritisieren allerdings zu Recht, dass die Schreibrichtung mehrstelliger Zahlen mit ostarabischen Symbolen von links nach rechts erfolgt, obwohl sie in Texten verwendet werden, in denen von rechts nach links geschrieben wird. Zusätzlich kritisieren sie, dass der umgekehrte SNARC-Effekt im Vergleich zum SNARC-Effekt bei den von Dehaene et al. rekrutierten französischen Versuchspersonen klein und inkonsistent war.

Für den Nachweis der Lese- und Schreibrichtung als Ursache der räumlich-numerischen Assoziation wurde wiederholt der vertikale SNARC-Effekt herangezogen. Ito und Hatta (2004) untersuchten japanische Versuchspersonen, die von oben nach unten schreiben, woraus sie die Hypothese ableiteten, kleine Zahlen seien mit ‚oben' und große Zahlen mit ‚unten' assoziiert. Die Reaktionstasten waren übereinander angeordnet, präsentiert wurden alle Zahlen von 1–9 (ohne die Zahl 5). Entgegen der Hypothese konnte auf kleine Zahlen schneller mit der unteren Taste und auf große Zahlen schneller mit der oberen Taste reagiert werden. Der Zusammenhang war jedoch nur mäßig ausgeprägt, was am Determinationskoeffizienten von $R^2 = .248$ erkenntlich wird. Zu einem ähnlichen Zusammenhang gelangten auch Schwarz und Keus (2004), jedoch mit einer besseren Varianzaufklärung (49.2 %). Hung, Hung, Tzeng und Wu (2008) wiesen bei taiwanesischen Versuchspersonen einen vertikalen SNARC-Effekt unter Verwendung chinesischer Zahlcharaktere nach, deren Schreibrichtung von oben nach unten verläuft. Konträr zu den Ergebnissen von Ito und Hatta wurden kleine Zahlen mit ‚oben' und große Zahlen mit ‚unten' assoziert. Wenn man bedenkt, dass es in der Schreib- bzw. Leserichtung in der Horizontalen Unterschiede gibt, in fast allen Kulturen jedoch von oben nach unten geschrieben wird, so erscheint der vertikale SNARC-Effekt für die Suche nach der Ursache des SNARC-Effekts unergiebig. Findet man jedoch bei Versuchspersonen, die von rechts nach links schreiben einen umgekehrten SNARC-Effekt, dann wäre ein Beitrag der Lese- und Schreibrichtung auf den SNARC-Effekt erbracht. Genau dieses

[4] Ostarabische Ziffern werden auch als Hindi-Ziffern bezeichnet und sind heutzutage noch in Ägypten, Syrien, Afghanistan, im Irak und Iran im Gebrauch (Ifrah, 1991).

Ergebnis erhielten Shaki, Fischer und Petrusic (2009) mit palästinensischen Versuchspersonen.

Der SNARC-Effekt gilt als Eigenschaft der numerischen Größenrepräsentation und gibt dessen Assoziation numerisch kleiner Zahlen mit ‚links' und numerisch großer Zahlen mit ‚rechts' wieder. Er konnte mit unterschiedlichsten Aufgaben gezeigt werden und ist nicht vom Effektor Hand abhängig. Die flexiblen Eigenschaften des SNARC-Effekts äußern sich u. a. in dessen Abhängigkeit vom verwendeten Zahlenintervall. Die Lese- und Schreibrichtung wird noch immer als Ursache der räumlich-numerischen Assoziation diskutiert.

2.2.3.2 Modellvorstellungen zum SNARC-Effekt

Polaritätskorrespondenz-Prinzip Proctor und Cho (2006) verfolgten mit der Formulierung ihres Polaritätskorrespondenz-Prinzips den Ansatz, zahlreiche Effekte binärer Klassifikationsaufgaben zu erklären. Darunter zählen z. B. der orthogonale Kompatibilitätseffekt (Vorteil der S-R-Zuordnung oben/rechts und unten/links) nach Bauer und Miller (1982) und der SNARC-Effekt. Das Prinzip besagt, dass in binären Klassifikationsaufgaben die Stimulus- und Reaktionsalternativen mit der Polarität ‚−' bzw. ‚+' codiert werden und die Antwortauswahl bei Übereinstimmung dieser Polaritäten schneller vonstatten geht. Dabei wird die −/+Polarität als eine Form der strukturellen Ähnlichkeit der einflussreichen Taxonomie von Kornblum, Hasbroucq und Osman (1990) angesehen. Laut Proctor und Cho entsteht der SNARC-Effekt, weil es eine Korrespondenz der Polarität der numerischen Größe (− = numerisch klein, + = numerisch groß) mit der Polarität der Antwortseite (− = links, + = rechts) gibt. Die Autoren schlussfolgern „The SNARC effect has been attributed to representing the numbers along a horizontal line, but evidence suggests that it may be a consequence of coding large as + polarity and small as − polarity" (S. 430). Als Beleg führen sie den vertikalen SNARC-Effekt an (Ito & Hatta, 2004, Exp. 2A und 2B), der gemäß ihrer Auffassung bei Existenz eines räumlich orientierten mentalen Zahlenstrahls nicht auftreten dürfte. Dieses Argument erscheint jedoch wenig plausibel. Als zweiten Beleg für die Gültigkeit ihrer Erklärung des SNARC-Effekts beziehen sie sich ein weiteres Mal auf Ito und Hatta (2004, Exp. 3), die beim numerischen Vergleich mit der Standardzahl 5 keinen SNARC-Effekt fanden. Da der SNARC-Effekt jedoch wiederholt mit genau dieser Aufgabe gezeigt werden konnte (Gevers, Verguts et al., 2006; Nuerk, Bauer, Krummenacher, Heller & Willmes, 2005), müssen die Ergebnisse von Ito und Hatta stark angezweifelt werden. Ein letzter Kritikpunkt betrifft die intendierte Erklärung der Ergebnisse von Dehaene et al. (1993), die bekanntlich einen kontinuierlichen Zusammenhang zwischen der numerischen Größe und der dRT nachwiesen. Genau an dieser kontinuierlichen Form scheitert der Polaritätskorrespondenz-Ansatz jedoch, da dann die binäre durch eine feinere Abstufung der Stimuluscodes erweitert werden müsste.

Zwei-Wege-Modell nach Müller und Schwarz (2007a) Zahlreiche Untersuchungen deuten darauf hin, dass der SNARC-Effekt auf der Stufe der Antwortauswahl angesiedelt ist (Gevers, Ratinckx, De Baene & Fias, 2006; Keus, Jenks & Schwarz, 2005; Keus & Schwarz, 2005; Müller & Schwarz, 2007a), was Müller und Schwarz (2007a, s. a. Gevers, Ratinckx, De Baene & Fias, 2006) zur Formulierung ihres Zwei-Wege-Modells veranlasste. Das Modell wird schematisch in Abbildung 2.6 dargestellt. Müller und Schwarz nehmen an, dass die Zahl auf einer frühen Verarbeitungsstufe enkodiert wird und eine Identifizierung der relevanten (Parität) aber auch irrelevanten

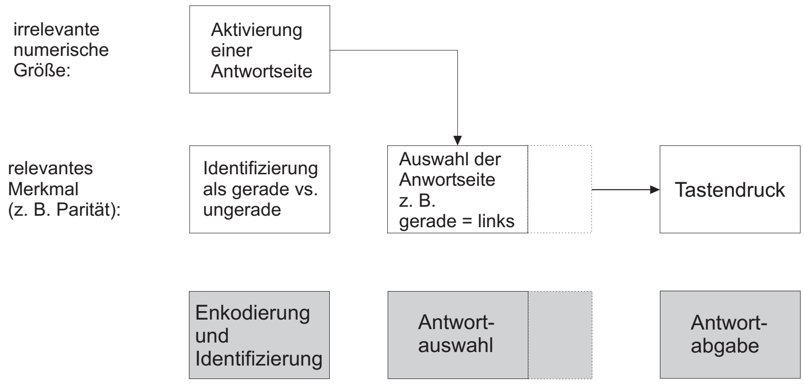


Abbildung 2.6. Schematisches Modell der Entstehung des SNARC-Effekts (Erläuterungen im Text), Abbildung in Anlehnung an Müller und Schwarz (2007a).

Merkmale (numerische Größe) stattfindet. Auf dieser Verarbeitungsstufe aktiviert die numerische Größe entsprechend ihrer Position auf dem mentalen Zahlenstrahl automatisch einen räumlichen Code. Auf der Verarbeitungsstufe der Antwortauswahl wird die entsprechende Antwort für das relevante Merkmal Parität ausgewählt. Laut Müller und Schwarz entsteht der SNARC-Effekt auf dieser Stufe, da der voraktivierte räumliche Code die für das relevante Merkmal auszuwählende Antwortseite erleichtert oder hemmt. Beispielsweise aktiviert die numerisch kleine Zahl 1 sehr stark die Antwortseite ‚links'. Eine Erleichterung der Antwortauswahl entsteht, wenn die Versuchsperson instruiert wurde, auf ungerade Zahlen mit einem linken Tastendruck zu reagieren. Umgekehrt würde es im Beispiel der Zahl 1 zu Hemmung kommen, wenn ungerade Zahlen mit einem rechten Tastendruck beantwortet werden sollen. Für die Implementierung des Zwei-Wege-Modells in Form eines Neuronalen Netzwerkmodells sei auf Gevers, Ratinckx et al. (2006) und Verguts, Fias und Stevens (2005) verwiesen.

2.2.4 Automatische Aktivierung

2.2.4.1 Der Größenkongruenzeffekt

Die weitreichende Aussage von Fischer et al. (2003), allein die Präsentation einer Zahl würde deren räumlich-numerische Assoziation aktivieren und infolgedessen zu einem Wechsel der räumlichen Aufmerksamkeit führen, wurde durch die Ergebnisse von Ristic et al. (2006) in Frage gestellt. Allerdings konnte mit den verschiedensten experimentellen Anordnungen die automatische Aktivierung der numerischen Größe gezeigt werden. Hierzu zählen der Größenkongruenzeffekt, Ergebnisse aus Priming-Experimenten und experimentelle Befunde zum *same-different*-Paradigma.

Für die Erläuterung des Größenkongruenzeffekts soll das Experiment von Henik und Tzelgov (1982) dienen. In diesem Experiment wurden Zahlenpaare präsentiert, deren Elemente im Bereich $[1,\ldots,9]$ lagen. Zusätzlich zur numerischen Größe wurde die physikalische Größe der Ziffern durch die Verwendung unterschiedlicher Schriftgrößen (4, 5 oder 6 mm) variiert. Jede Versuchsperson absolvierte zwei Sitzungen. In einer Sitzung lautete die Aufgabe, die numerisch größere der beiden Zahlen auszuwählen und die irrelevante physikalische Größe der Zahlen zu ignorieren.

In der anderen Sitzung sollte die physikalisch größere der beiden Zahlen bestimmt werden. Durch die Variation der numerischen und physikalischen Größe konnten kongruente, inkongruente und neutrale Zahlenpaare unterschieden werden. Ein Zahlenpaar galt als kongruent, wenn die numerische und physikalische Größe beider Zahlen zur gleichen Antwort führten. Beim Zahlenpaar 6 4 ist die Zahl 6 sowohl numerisch als auch physikalisch größer als die Zahl 4. Im inkongruenten Zahlenpaar 6 4 ist die Zahl 6 zwar numerisch größer jedoch physikalisch kleiner als die Zahl 4. Bei einem neutralen Zahlenpaar wurde nur die relevante Dimension variiert, beim numerischen Vergleich die numerische (z. B. 4 6) und beim physikalischen Vergleich die physikalische (z. B. 6 6). Sowohl in der numerischen als auch in der physikalischen Vergleichsaufgabe äußerte sich der Größenkongruenzeffekt in kürzeren Reaktionszeiten für kongruente und neutrale im Vergleich zu inkongruenten Zahlenpaaren. In beiden Aufgaben wurde die Entscheidung demnach durch die jeweils irrelevante Dimension beeinflusst. Die Autoren überprüften weiterhin den Einfluss der numerischen Differenz (Exp. 2), der in der numerischen Vergleichsaufgabe zum gewohnten numerischen Distanzeffekt führte. Beim physikalischen Vergleich wirkte sich die numerische Differenz nicht zusätzlich auf den Größenkongruenzeffekt aus.

Tzelgov et al. (1992) wählten zur Untersuchung des Größenkongruenzeffekts den Vergleich mit einer Standardzahl aus. Dazu boten sie den Versuchspersonen einzeln die Zahlen 2 bis 8 in einer kleinen oder großen Schriftgröße dar, die jeweils mit der Standardzahl 5 in mittlerer Schriftgröße verglichen werden sollten. Die Versuchspersonen wurden in Übungsdurchgängen mit der physikalischen Größe der Reize vertraut gemacht. Zu Beginn eines Durchgangs gab ein Cue an, ob die numerische oder physikalische Größe der Zahl beurteilt werden sollte. Die Reaktionszeitauswertung der numerischen Vergleichsaufgabe sowie der physikalischen Vergleichsaufgabe ergab den Größenkongruenzeffekt. Wie auch schon bei Henik und Tzelgov (1982) trat der numerische Distanzeffekt nur in der numerischen Vergleichsaufgabe auf. In der physikalischen Vergleichsaufgabe beeinflusste das irrelevante Merkmal numerische Differenz den Größenkongruenzeffekt nicht zusätzlich, was die Autoren darauf zurückführten, dass lediglich eine grobe Klassifizierung der numerischen Größe in „kleiner als der Standard“ bzw. „größer als der Standard“ stattfand. Man könnte einwenden, dass die Variable numerische Größe sechsstufig, die physikalische Größe hingegen nur zweistufig vorlag. Für den physikalischen Vergleich könnte die Einteilung der Reizmerkmale in ‚kleiner‘ und ‚größer‘ genügen. Allerdings bleibt der numerische Distanzeffekt beim physikalischen Größenvergleich auch dann aus, wenn die Variablen numerische und physikalische Größe jeweils vierstufig ausgeprägt sind (Schwarz & Heinze, 1998).

In einigen Untersuchungen werden unterschiedliche Ausprägungen des Größenkongruenzeffekts der numerischen im Vergleich zur physikalischen Vergleichsaufgabe berichtet. Im Experiment von Henik und Tzelgov (1982) ergab sich in der numerischen Vergleichsaufgabe ein stärker ausgeprägter Größenkongruenzeffekt. Gleichzeitig wurde in dieser im Vergleich zur physikalischen Aufgabe mehr Zeit benötigt. Im Gegensatz dazu erhielten Schwarz und Heinze (1998) in der physikalischen Vergleichsaufgabe längere Reaktionszeiten sowie einen größeren Kongruenzeffekt. Im Experiment von Tzelgov et al. (1992) gab es weder Unterschiede in den Gesamtreaktionszeiten der beiden Aufgaben noch Unterschiede in der Größe der Kongruenzeffekte. Pansky und Algom (1999) belegten auf eindrucksvolle Weise in mehreren Experimenten, dass die asymmetrische Ausprägung der Größenkongruenzeffekte auf die unterschiedliche Salienz der relevanten bzw. irrelevanten Dimension zurückzuführen ist. Die Manipulation der Salienz der beiden Dimensionen erfolgte über die Auswahl der physikalischen Größen: Kleinere Abstände zwischen den einzelnen physikalischen Größen hatten eine größere Salienz der numerischen Größe zur Folge. Umgekehrt stellte die physikalische Größe die leichter zu unterscheidende Dimension dar, wenn größere Abstände zwischen den physikalischen Größen ausgewählt wurden. In jedem Experiment wurden sieben numerische und sieben physikalische Größen verwendet, pro Durchgang sollte entweder die numerisch oder die physikalisch größere Zahl eines Zahlenpaares bestimmt werden. In Experiment 3 ergab die Variation der numerischen und physikalischen Größe vergleichbare mittlere Reaktionszeiten im numerischen und physikalischen Vergleich. Dies hatte vergleichbare Ausprägungen der Größenkongruenzeffekte zur Folge. In Experiment 4 reagierten die Versuchspersonen schneller in der numerischen Vergleichsaufgabe im Vergleich zur physikalischen Vergleichsaufgabe, wobei der Kongruenzeffekt in der physikalischen Aufgabe eine größere Ausprägung aufwies. Umgekehrt erzielten die Versuchspersonen in Experiment 5 im Mittel kürzere Reaktionszeiten in der physikalischen Vergleichsaufgabe, was zu einem stärkeren Größenkongruenzeffekt in der numerischen Aufgabe führte. Leider vermisst man in der Auswertung die Überprüfung des Einflusses der relevanten bzw. irrelevanten Distanz.

Eben diesem Einfluss der relevanten bzw. irrelevanten Distanz wendeten sich Schwarz und Ischebeck (2003) zu. Diese erklären die Muster der Größenkongruenzeffekte sowie den Einfluss der relevanten bzw. irrelevanten Distanz über die unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeit mittels *relative speed account*. Diesem Ansatz liegen zwei zentrale Annahmen zugrunde. Die erste lautet, dass unterschiedliche Reizattribute, in diesem Fall die numerische und physikalische Größe, automatisch verarbeitet werden. Dies bedeutet, dass auch das irrelevante Attribut nicht vollständig ignoriert werden kann und das abzugebende Urteil zu einem gewissen Grad beeinflusst. In der zweiten Annahme wird davon ausgegangen, dass der Grad dieser Beeinflussung vom zeitlichen Verlauf der Verarbeitung der involvierten Attribute abhängt. So sollte das langsamer verarbeitete Attribut, wenn es irrelevant ist, weniger oder gar keine Interferenz hervorrufen, da die Zeitspanne für einen störenden Einfluss geringer ist. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Pansky und Algom (1999). In Bezug auf die relevante und irrelevante Distanz ergeben sich aus dem Modell zwei weitere qualitative Vorhersagen. Einerseits sollte das Verkleinern der relevanten Distanz zum Standard mit einer Zunahme des Größenkongruenzeffekts einhergehen. Andererseits sollte sich mit Zunahme der irrelevanten Distanz zum Standard der Größenkongruenzeffekt vergrößern. Diese Vorhersagen ergeben sich aus der Tatsache, dass die Abnahme der relevanten bzw. Zunahme der irrelevanten Distanz eine Vergrößerung des Zeitintervalls zur Folge hat, in welchem das irrelevante Attribut störend auf das relevante wirken kann. Beide Vorhersagen ließen sich durch Ergebnisse zweier Experimente zum numerischen bzw. physikalischen Vergleich mit einer Standardzahl von Schwarz und Ischebeck bestätigen.

Zur Reaktionszeitmodellierung griffen Schwarz und Ischebeck (2003) auf ein *diffusion model* (siehe Abbildung 2.7) aus der Klasse der *random walk* Modelle zurück. *Random walk* Modelle wurden von unterschiedlichen Forschergruppen zur Beschreibung des symbolischen Vergleiches vorgeschlagen (Birnbaum & Jou, 1990; Buckley & Gillman, 1974; Link, 1990; Poltrock, 1989). An dieser Stelle soll eine qualitative Charakterisierung der *random walk* Modelle nach Poltrock (1989) genügen. Dieser fasst die internalen Repräsentationen der numerischen Größen als Zufallsvariablen auf. Jede Zahl induziert einen (stochastischen) Prozess, der die numerische Information sammelt. Gleichzeitig berechnet ein Entscheidungsprozess in kleinen Zeiteinheiten die Differenz der Informationen beider Zahlen und addiert diese auf. Diese Differenz wird häufig als akkumulierte Evidenz bezeichnet und kann positive oder negative Werte annehmen. Da die akkumulierte

Evidenz erneut als Zufallsvariable aufgefasst wird, ähnelt sie über die Zeiteinheiten hinweg einem *random walk*. Die Idee lautet nun, dass die für das Urteil notwendige Information solange akkumuliert wird, bis eine von zwei Evidenzgrenzen −a bzw. +a zum Zeitpunkt t erreicht ist. Diese Evidenzgrenzen repräsentieren die zwei möglichen Antworten einer Wahlreaktionsaufgabe. Dabei stellt die Zeit in einem *random walk* Modell eine diskrete Variable dar, wohingegen diskrete Zeiteinheiten Δt im *diffusion model* gegen Null laufend betrachtet werden und die Zeit somit eine kontinuierliche Variable ist (Busemeyer & Diederich, 2010).

Die Berechnung der akkumulierten Evidenz unterscheidet sich von Autor zu Autor. Im Modell von Schwarz und Ischebeck (2003) gehen sog. Driftraten μ ein, deren Absolutwerte die Geschwindigkeit des Erreichens der Evidenzgrenze angeben. Je größer beispielsweise die numerische Differenz ist, desto größer ist auch der Absolutbetrag der Driftrate. Weiterhin können die Driftraten positive oder negative Vorzeichen besitzen, je nachdem, ob die Evidenz in Richtung der Evidenzgrenze −a oder +a akkumuliert wird. Da die Information des irrelevanten Attributs laut Größenkongruenzeffekt nicht ignoriert werden kann, nehmen Schwarz und Ischebeck weiterhin an, dass die Driftrate des relevanten Attributs zu einem bestimmten Grad auch von der Driftrate des irrelevanten Attributs beeinflusst wird. In Abbildung 2.7 wird der Einfluss des irrelevanten Attributs durch $\Delta\mu$ dargestellt. Im kongruenten Fall erhöht sich die Driftrate um den Wert $\Delta\mu$, im inkongruenten Fall wird die Driftrate um den Wert $\Delta\mu$ verringert. Wie aus Abbildung 2.7 hervorgeht, wird die Evidenzgrenze durch die Erhöhung bzw. Herabsetzung der Driftrate zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_{kongr} im kongruenten Fall bzw. $t_{inkongr}$ im inkongruenten Fall erreicht. Die Schätzung der Parameter und der sich daran anschließende Modellfit mittels χ^2-Test bestätigt, dass die Daten gut mit dem Modell übereinstimmen.

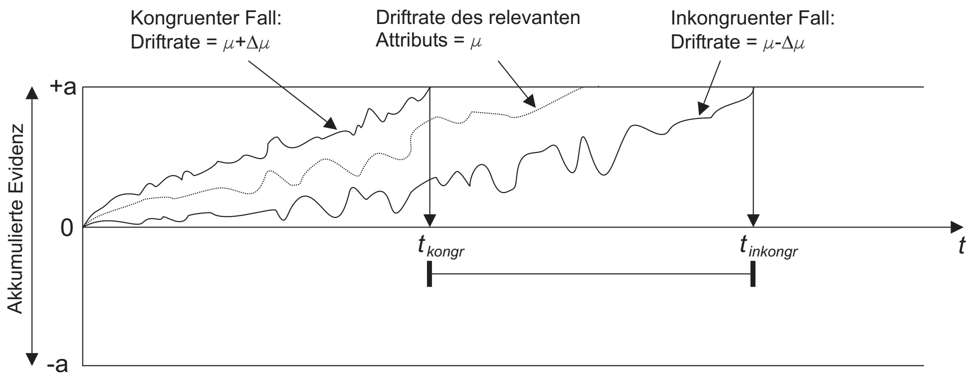


Abbildung 2.7. Das *diffusion model* nach Schwarz und Ischebeck (2003) zur Erklärung des Größenkongruenzeffekts (Erläuterungen im Text).

Ein letzter zu diskutierender Aspekt des Größenkongruenzeffekts ist dessen Entstehungszeitpunkt im Verarbeitungsprozess. Schwarz und Heinze (1998) unterscheiden zwei Möglichkeiten. Zum einen könnten die physikalische und numerische Größe zunächst in eine gemeinsame analoge Repräsentation integriert werden, auf deren Basis dann die Antwort (‚kleiner‘ oder ‚größer‘) ausgewählt wird. Der Größenkongruenzeffekt sollte folglich in frühen Verarbeitungsstufen beobachtbar sein. Alternativ könnte jedoch angenommen werden, dass die Verarbeitung der numerischen und physikalischen Größe parallel in funktionell unabhängigen Kanälen stattfindet und zwei spezifische Subantworten aktiviert werden. Der Größenkongruenzeffekt würde in inkongruenten Durchgängen aufgrund eines Antwortwettbewerbes entstehen und sollte sich erst auf der späten Stufe der Antwortaktivierung zeigen lassen. Anhand ereigniskorrelierter Potenziale bestimmten Schwarz und Heinze, zu welchem Zeitpunkt Effekte der numerischen Differenz sowie der Größenkongruenz entstehen. Die Ergebnisse der P300-Komponente ließen sich eher mit der Entstehung des Größenkongruenzeffekts auf einer frühen Stufe vereinen. Am aussagekräftigsten war allerdings die Betrachtung des lateralisierten Bereitschaftspotenzials (LRP, *lateralized readiness potential*). Das LRP wird als Differenz zwischen den abgeleiteten Potenzialen über dem linken und rechten motorischen Cortex (C3 und C4) berechnet. Es basiert auf dem Faktum, dass kontralateral zur Antworthand eine maximale Aktivierung im motorischen Cortex beobachtet werden kann. Mit Hilfe des LRP lassen sich Effekte der selektiven Antwortaktivierung abbilden, wobei negative Werte auf die selektive Aktivierung der korrekten Antwort hinweisen, positive Werte hingegen auf die selektive Aktivierung der inkorrekten Antwort. Die Auswertung der LRP-Verläufe inkongruenter Durchgänge erbrachte zu keinem Zeitpunkt eine selektive Aktivierung der falschen Antworthand – weder in der physikalischen noch in der numerischen Vergleichsaufgabe. Insgesamt sprechen die Ergebnisse dafür, dass der Größenkongruenzeffekt auf einer frühen Verarbeitungsstufe entsteht.

2.2.4.2 Priming-Experimente

Die Ergebnisse zahlreicher Priming-Experimente liefern zusätzliche Evidenz für die automatische Aktivierung der numerischen Größe. Einen ersten Hinweis darauf berichtet Brysbaert (1995, Exp. 4) mit einer Benenn-Aufgabe (*naming task*). Den Versuchspersonen wurden mit einer SOA (*stimulus-onset asynchrony*) von 0, 200, 400 oder 600 ms nebeneinander zwei zweistellige Zahlen präsentiert. Ein Pfeil unterhalb einer der beiden Zahlen kennzeichnete den Zielreiz, der von der Versuchsperson benannt werden sollte. Die andere Zahl des Reizpaares galt als *prime*. Die als Zielreiz fungierende Zahl nahm Werte im Bereich $[11,\ldots,90]$ an, der *prime* wies eine numerische Distanz zum Zielreiz von $d = \pm 1$ bis $d = \pm 8$ auf. Mittels multipler Regressionsanalyse ließ sich ein signifikanter Beitrag der (logarithmierten) numerischen Größe des Zielreizes sowie der numerischen Differenz zwischen *prime* und Zielreiz auf die Benennzeiten feststellen. Kleinere numerische Differenzen gingen mit kürzeren Benennzeiten einher.

Reynvoet, Brysbaert und Fias (2002, Exp. 1) maskierten die *primes*, indem sie eine Vorwärtsmaske sowie eine Rückwärtsmaske, bestehend aus sechs Rautenzeichen (#), für je 57 ms präsentierten. Die *primes* wurden ebenfalls für 57 ms präsentiert. Im Anschluss an die Rückwärtsmaske erschien der Zielreiz, der von den Versuchspersonen benannt werden sollte. Dieser Zielreiz konnte die Werte 4–9 annehmen, die *primes* lagen im Bereich Zielreiz ±3. Auch mit maskierten *primes* konnte ein Einfluss der numerischen Differenz zwischen *prime* und Zielreiz auf die Benennzeiten belegt werden. Außerdem überprüften die Autoren die Sichtbarkeit der *primes* mit einem Kontrollexperiment. Der erhaltene Wert $d' = 0.94$ deutet darauf hin, dass die Maskierung keineswegs zur Unsichtbarkeit der *primes* führte.

Koechlin, Naccache, Block und Dehaene (1999) interessierten sich u. a. dafür, ob sich ein semantischer Priming-Effekt für den numerischen Vergleich zum Standard 5 zeigen lässt. Die Autoren präsentierten ihren Versuchspersonen in einem Durchgang nacheinander zwei einstellige Zahlen. Für jede der beiden Zahlen sollte per Tastendruck angegeben werden, ob diese numerisch größer oder kleiner als der Standard 5 ist. Die erste Zahl nahm Werte zwischen 1–9 (ohne die Zahl 5) an, die zweite nur die Werte 1, 4, 6 oder 9. Zum Versuchsablauf ist anzumerken, dass die zweite Zahl 200 ms nach der Antwortabgabe auf die erste Zahl für eine Dauer von 200 ms präsentiert wurde. Somit diente die erste Zahl als *prime* für die zweite Zahl. In die Auswertung flossen nur die Reaktionszeiten auf die zweite Zahl ein, und zwar unter der Bedingung, dass beide Zahlen aus dem gleichen Zahlenintervall (< 5 oder > 5) stammten. Neben einem signifikanten Einfluss der numerischen Distanz zum Standard 5 ergab sich auch in diesem Experiment ein signifikanter Einfluss der numerischen Differenz zwischen *prime* und Zielreiz. Je kleiner die numerische Differenz zwischen *prime* und Zielreiz war, desto schneller klassifizierten die Versuchspersonen den Zielreiz in < 5 bzw. > 5. In einer zweiten Experimentreihe gingen Koechlin et al. (1999, Exp. 2A, 2B) der Frage nach, inwieweit sich diese Ergebnisse auch mit maskierten *primes* zeigen lassen. Die Versuchspersonen sollten jedoch nur noch auf den Zielreiz reagieren. Der Versuchsablauf wurde dahingehend geändert, dass der *prime* für 66 ms präsentiert wurde und von einer Vorwärts- sowie einer Rückwärtsmaske, bestehend aus einem String nicht-numerischer ASCII-Zeichen, umgeben war. Die Mustermasken wurden für je 66 ms präsentiert. Auf diese Art und Weise konnten die Autoren zeigen, dass der Priming-Effekt auch dann bestehen bleibt, wenn der *prime* nur für kurze Zeit präsentiert wird. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Reynvoet und Brysbaert (1999) für die Zielreize 5–15 und *primes* im Bereich Zielreiz ±3 berichtet.

Die Ergebnisse von Dehaene et al. (1998) liefern darüber hinaus einen Hinweis darauf, dass der *prime* bis zur Stufe der Antwortauswahl verarbeitet wird. Die Autoren ließen einen numerischen Vergleich mit der Standardzahl 5 durchführen. Vor jeder zu beurteilenden Vergleichszahl wurde ein *prime* (Zahl 1–9) subliminal präsentiert. Die Auswertung der Reaktionszeiten ergab, dass die Antwortabgabe dann schneller erfolgte, wenn *prime* und Zielreiz mit der gleichen Antwort (beide < 5 oder beide > 5) assoziiert waren. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten auch Naccache, Blandin und Dehaene (2002) sowie Reynvoet, Caessens und Brysbaert (2002, siehe jedoch Damian, 2001).

An dieser Stelle würde eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse subliminaler Priming-Experimente den Rahmen sprengen. Eine ausführliche Darstellung liefern z. B. Van den Bussche, Van den Noortgate und Reynvoet (2009) oder Dehaene und Naccache (2001). Die Ergebnisse der Priming-Experimente sollten aufzeigen, dass die Präsentation eines *primes* in Form einer Zahl zu einer automatischen Aktivierung der korrespondierenden mentalen Größenrepräsentation führt, wodurch die Bearbeitung der als Zielreiz präsentierten Zahl beeinflusst wird.

2.2.4.3 *Same-different*-Paradigma

Ein weiterer Beleg für die automatische Aktivierung der numerischen Größe ist durch Ergebnisse zum *same-different*-Paradigma gegeben. Duncan und McFarland (1980, Exp. 2) forderten ihre Versuchspersonen auf zu entscheiden, ob die zwei Zahlen eines Zahlenpaares physikalisch gleich oder verschieden sind. Präsentiert wurden Zahlenpaare mit zwei gleichen Ziffern (z. B. 1 1, 2 2 etc.) und Zahlenpaare mit zwei verschiedenen Ziffern. Letztere Zahlenpaare, auf die mit „verschieden“ geantwortet werden sollte, bestanden entweder aus zwei Zahlen mit kleinen numerischen Differenzen ($d = 1$ bis $d = 3$) oder aus zwei Zahlen mit großen numerischen Differenzen ($d = 6$ bis $d = 8$). Obwohl diese Aufgabe auf der Basis von perzeptuellen Informationen gelöst werden kann und die numerische Größe für die Antwort irrelevant ist, wurden die *different*-Urteile von der numerischen Differenz beeinflusst. Auf Zahlenpaare mit großen numerischen Differenzen konnte im Vergleich zu Zahlenpaaren mit kleinen numerischen Differenzen schneller geantwortet werden.

Dehaene und Akhavein (1995) erweiterten die Versuchsanordnung von Duncan und McFarland (1980) durch die Unterscheidung einer numerischen Vergleichsaufgabe (Exp. 1) von einer physikalischen Vergleichsaufgabe (Exp. 2). In beiden Aufgaben wurden Zahlenpaare dargeboten, deren Elemente sowohl in Form von Zahlsymbolen als auch in Form von Zahlwörtern dargestellt wurden. In der numerischen Vergleichsaufgabe sollte beurteilt werden, ob die beiden Elemente des Zahlenpaares numerisch gleich sind. Beispielsweise erforderten die Darstellungen 1 ONE oder 5 5 die Antwort „same“, die Darstellungen SEVEN 6 oder 8 9 hingegen die Antwort „different“. In der physikalischen Vergleichsaufgabe sollte die physikalische Gleichheit der Reize beurteilt werden. Es sollte demzufolge auf Paare der Form FIVE FIVE oder 8 8 mit *same* und auf Paare der Form SIX 6 oder ONE TWO mit *different* geantwortet werden. In der numerischen Vergleichsaufgabe ist der Einfluss der numerischen Differenz wenig überraschend. Weitaus beeindruckender ist der Einfluss der numerischen Differenz in der physikalischen Vergleichsaufgabe. Er ließ sich in solchen Durchgängen zeigen, in denen das Darstellungsformat der beiden numerischen Größen übereinstimmte (z. B. 3 7 oder SIX ONE), obwohl die physikalischen Unterschiede für das verschieden-Urteil ausreichend gewesen wären.

Die Experimente von Dehaene und Akhavein (1995) sowie Duncan und McFarland (1980) verdeutlichen, dass selbst einfache Gleichheitsurteile von den numerischen Eigenschaften nicht unbeeinflusst bleiben.

2.2.5 Der Einfluss der Instruktion

In Abschnitt 2.1 wurde der semantische Kongruenzeffekt kurz erläutert. Dieser besagt, dass aus zwei numerisch kleinen Zahlen schneller die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden kann, während aus zwei numerisch großen Zahlen schneller die numerisch größere Zahl bestimmt werden kann. Eine Übereinstimmung der Instruktion mit der relativen Position der numerischen Größe im präsentierten Zahlenintervall führt demzufolge zu kürzeren Reaktionszeiten. Im Folgenden werden drei Modellansätze zur Erklärung dieses Effekts erläutert.

Semantic-coding model Im Modell von Banks et al. (1976, s. a. Banks, 1977) lautet die grundsätzliche Idee folgendermaßen. In einem ersten Schritt werden aus den präsentierten Zahlen diskrete Stimuluscodes erstellt, die dann in einem zweiten Schritt, wenn notwendig, so transformiert werden, dass ein Abgleich mit dem Instruktionscode erfolgen kann. Im letzten Schritt wird die Antwort ausgewählt und abgegeben. Das Modell besteht somit aus drei sequenziellen Phasen mit einer additiven Wirkung auf die Reaktionszeiten. Auf der Stufe der Enkodierung wird für jede Zahl in Abhängigkeit von einem *cutoff*-Wert ein Stimuluscode generiert. Jede Zahl wird entsprechend diesem *cutoff*-Wert als kleiner ($S+$) oder größer ($L+$) codiert. Der *cutoff*-Wert variiert von Durchgang zu Durchgang und nimmt aufgrund der nicht-linearen Komprimierung der mentalen Größenrepräsentation Werte an, die kleiner als das arithmetische Mittel der verwendeten Zahlen sind. Dementsprechend liegt der *cutoff*-Wert eher zwischen zwei numerisch kleinen als zwei numerisch großen Zahlen. Liegen beide Zahlen eines Zahlenpaares oberhalb (unterhalb) des *cutoff*-Wertes, dann lauten die Codes $L+/L+$ ($S+/S+$), andernfalls lauten die Codes $L+/S+$ bzw. $S+/L+$. Auf der Vergleichsstufe werden die aus der Instruktion abgeleiteten Instruktionscodes mit den Stimuluscodes verglichen. Dabei folgt die Generierung der Instruktionscodes dem gleichen

Schema; die Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl“ wird als $S+$ und die Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ als $L+$ codiert. Wurden den beiden Zahlen eines Zahlenpaares unterschiedliche Codes zugewiesen (also: $L+/S+$ oder $S+/L+$), dann kann die entsprechende Antwort sofort ausgewählt werden. Stimmen die beiden Codes eines Zahlenpaares jedoch überein, dann muss eine feinere Unterscheidung in $L/L+$ bzw. $S/S+$ erfolgen, auf deren Basis dann die entsprechende Antwortauswahl stattfinden kann.

Der semantische Kongruenzeffekt entsteht durch die generelle Übereinstimmung zwischen Stimulus- und Instruktionscodes. Beispielsweise wird das Zahlenpaar 8 9 zunächst als $L+/L+$ und in einem zweiten Schritt als $L/L+$ codiert. Unter der Instruktion, die numerisch größere Zahl auszuwählen ($L+$), kann die richtige Antwort für das Zahlenpaar 8 9 schnell bestimmt werden. Lautet die Instruktion hingegen, aus diesem Zahlenpaar die numerisch kleinere Zahl auszuwählen ($S+$), dann existiert weder mit L noch mit $L+$ eine Übereinstimmung und der $L/L+$-Code muss in einem weiteren Schritt in $S+/S$ transformiert werden. Umgekehrt erfolgt aus einem Zahlenpaar mit zwei numerisch kleinen Zahlen ($S/S+$) die Auswahl der numerisch kleineren Zahl ($S+$) schneller als die Auswahl der numerisch größeren Zahl ($L+$). Die Annahme, dass der *cutoff*-Wert kleiner ist als das arithmetische Mittel der verwendeten Zahlen und deshalb mehr $L+/L+$-Codierungen und weniger $S+/S+$-Codierungen zustande kommen, führt zu einer weiteren Vorhersage: Mit der ‚größer‘-Instruktion entstehen im Vergleich zur ‚kleiner‘-Instruktion kürzere Reaktionszeiten. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass bei einer anfänglichen $L+/L+$-Codierung unter der Instruktion, die numerisch kleinere Zahl auszuwählen, häufiger eine Transformation stattfinden muss. Diese Vorhersage steht im Einklang mit dem in der Literatur immer wieder berichteten generellen Reaktionszeitvorteil der ‚größer‘-Instruktion (z. B. Banks et al., 1976; Dehaene et al., 1990; Parkman, 1971; Shoben, Cech, Schwanenflugel & Sailor, 1989).

Das Besondere an diesem Modell ist, dass nicht die analogen Größenrepräsentationen für den Vergleich herangezogen werden, sondern die daraus abgeleiteten Stimuluscodes. Auf der Vergleichsstufe werden demzufolge nur noch Codes verarbeitet, die Banks (1977) als „discrete, componential semantic codes of natural language“ (S. 131) charakterisierte. Gerade diese Annahme macht das Modell jedoch durch Befunde angreifbar, die zeigen, dass auch bei mentalen Vergleichen zwischen distinkten Kategorien – entgegen der Modellvorhersage – symbolische Distanzeffekte auftreten. Pohl (1987, zit. nach Blankenberger, 1992) brachte seinen Versuchspersonen in der Lernphase ein Kartenspiel bei, das aus einer zeitlichen Abfolge von Handlungsschritten bestand. Diese Handlungsschritte waren in drei unterscheidbare Abschnitte unterteilt. Im Anschluss an die Lernphase bot er jeweils zwei Handlungsschritte dar, die aus dem gleichen Abschnitt oder verschiedenen Abschnitten stammten. Die Versuchsperson sollte entscheiden, welcher Handlungsschritt in der zeitlichen Abfolge zuerst auftrat. Der symbolische Distanzeffekt ergab sich sowohl für Vergleiche innerhalb der Abschnitte als auch für Vergleiche zwischen Abschnitten, was die Annahme einer Code-Generierung widerlegt.

Discriminability model Jamieson und Petrusic (1975) schlugen in ihrem *discriminability model* für die Entstehung des semantischen Kongruenzeffekts vor, dass die Instruktion zur Auswahl eines Referenzpunktes führt. In ihrem Modell besteht der Vergleich nicht zwischen den mentalen Repräsentationen der zwei Zahlen eines Zahlenpaares, sondern im Vergleich der beiden Distanzen zum Referenzpunkt. Wird beispielsweise das Zahlenpaar 7 8 präsentiert, dann werden die mentalen Repräsentationen $s(7)$ und $s(8)$ entsprechend ihrer Position auf dem mentalen Zahlenstrahl aktiviert. Werden ausschließlich einstellige Zahlen dargeboten und die Aufgabe lautet, die numerisch kleinere Zahl auszuwählen, dann könnte der Referenzpunkt auf die Zahl 1 gesetzt werden. Soll umgekehrt die Auswahl der numerisch größeren Zahl erfolgen, dann könnte die Zahl 9 als Referenzpunkt dienen. In einem ersten Schritt wird das Verhältnis V der beiden Distanzen durch

$$V = \frac{s_{ref} - s(x)}{s_{ref} - s(y)} \tag{2.4}$$

bestimmt, wobei s_{ref} die Position des Referenzpunktes und $s(x)$ sowie $s(y)$ die Positionen der beiden Vergleichszahlen auf dem mentalen Zahlenstrahl darstellt. Ist das Verhältnis kleiner oder gleich 1, dann ist x die größere Zahl, ansonsten y. Laut Jamieson und Petrusic entstehen umso kürzere Reaktionszeiten, je weiter V von 1 entfernt ist. Der semantische Kongruenzeffekt ergibt sich, weil V für numerisch kleine Zahlenpaare (z. B. 1 2) mit der ‚kleiner'-Instruktion sowie für numerisch große Zahlenpaare (z. B. 8 9) mit der ‚größer'-Instruktion am weitesten von 1 entfernt ist. Umgekehrt ist V nahe 1, wenn beispielsweise ein numerisch kleines (großes) Zahlenpaar mit der ‚größer'-Instruktion (‚kleiner'-Instruktion) kombiniert wird.

Dehaene (1989) erweiterte dieses Modell auf den numerischen Vergleich mit einer Standardzahl, indem er von der simultanen Verwendung zweier Referenzpunkte ausging. Daraus leitete er eine Modellgleichung für den numerischen Vergleich zweier gleichzeitig präsentierter Zahlen ab:

$$RT(x,y) = a \cdot \log \left| \frac{s(x) - s(y)}{max\left[|s(ref) - s(x)|, |s(ref) - s(y)| \right]} \right| + b. \tag{2.5}$$

Auch mit dieser Gleichung werden umso kürzere Reaktionszeiten vorhergesagt, je weiter der Quotient von 1 entfernt ist. Tatsächlich wurde diese Gleichung jedoch nie zur Reaktionszeitmodellierung verwendet, da Dehaene in seinen Experimenten lediglich den numerischen Vergleich mit einer Standardzahl durchführen ließ. Anzumerken ist jedoch der Vorschlag Dehaenes, die logarithmierten Werte der Vergleichszahlen und Referenzpunkte zu verwenden, um so die logarithmische Komprimierung des mentalen Zahlenstrahls zu berücksichtigen. Dadurch ist der Abstand des größeren Referenzpunktes zu den Vergleichszahlen im Mittel kleiner als der Abstand des kleineren Referenzpunktes zu den Vergleichszahlen, was wiederum kürzere Reaktionszeiten unter der ‚größer'-Instruktion mit sich bringt.

Zwar konnte Dehaene (1989) für den numerischen Vergleich einer Standard- mit einer Vergleichszahl eine gute Datenanpassung erzielen, dennoch bleibt die Frage offen, weshalb zwei (Jamieson & Petrusic, 1975) oder mehr Vergleichsprozesse (Dehaene, 1989) stattfinden sollen, wenn der Vergleich zwischen den beiden präsentierten Zahlen im Prinzip ausreichend wäre.

Random walk Auf diese Modellklasse wurde schon im Abschnitt 2.2.4.1 ausführlich eingegangen. In den einzelnen Modellrealisierungen wird der semantische Kongruenzeffekt auf unterschiedliche Weise berücksichtigt. Zu nennen sind beispielsweise Birnbaum und Jou (1990) sowie Link (1990), die einen *bias* einführen. Dazu nehmen sie an, dass der Startwert der akkumulierten Evidenz eben nicht wie im Diffusionsmodell von Schwarz und Ischebeck (2003) bei Null beginnt, sondern die relative numerische Größe der beiden Zahlen eine Verschiebung des Startwertes in Richtung der oberen oder unteren Evidenzgrenze induziert. Werden zwei numerisch große Zahlen präsentiert, dann wird der Startwert in Richtung der Grenze für die größer-Antwort verschoben. Lautet die Instruktion nun, die numerisch größere Zahl auszuwählen, dann ist der Abstand zwischen dem Startwert und der Evidenzgrenze für die größer-Antwort geringer. Damit muss weniger Evidenz akkumuliert werden, woraus eine kürzere Reaktionszeit resultiert. Im Falle der Präsentation zweier numerisch kleiner Zahlen wird der Startwert in Richtung der kleiner-Antwort verschoben und es muss mehr Evidenz gesammelt werden, um die Grenze für die größer-Antwort zu erreichen.

Schwarz und Stein (1998) hinterfragen jedoch zu Recht, wie genau dieser Prozess der Startwertverschiebung vonstatten gehen soll. Birnbaum und Jou (1990) nehmen an, dass diese Adjustierungen durch die *a priori* Wahrscheinlichkeiten der Antworten der beiden Reize in Gang gesetzt werden. Werden beispielsweise Zahlenpaare aus dem Intervall $[1,\ldots,9]$ präsentiert, dann ist die Zahl 9 in jedem Zahlenpaar die numerisch größte Zahl. Folgt man diesem Vorschlag, so kann die Evidenzakkumulierung erst starten, wenn die beiden Reize enkodiert wurden und die Identität jeder Zahl vorliegt. Im Gegensatz dazu wird in *random walk* Modellen aber davon ausgegangen, dass der Prozess der Evidenzakkumulierung mit dem Abruf der numerischen Information jeder Zahl aus dem Langzeitgedächtnis einsetzt (siehe Abschnitt 2.2.4.1). Ungeachtet dessen bleibt der semantische Kongruenzeffekt bestehen, wenn die Antwort-Wahrscheinlichkeit für jede Zahl kontrolliert wird (Schwarz & Stein, 1998). Die psychologische Interpretation des *bias* ist somit ungeklärt.

Im Unterschied zum *semantic-coding model* von Banks et al. (1976) wird sowohl im *discriminability model* (Dehaene, 1989; Jamieson & Petrusic, 1975) als auch im *random walk* Modell (Birnbaum & Jou, 1990; Link, 1990) die relative Position der numerischen Größe auf dem mentalen Zahlenstrahl für die Entstehung des semantischen Kongruenzeffekts verantwortlich gemacht.

2.3 Von den positiven zu den negativen Zahlen

Aus den letzten Abschnitten sollte deutlich geworden sein, dass die Annahme der analogartigen mentalen Größenrepräsentation im positiven Zahlenbereich eine gute empirische Unterstützung findet. Die zahlreichen Effekte beim numerischen Vergleich – insbesondere der numerische Distanz- und Größeneffekt – werden in der Mehrheit der Publikationen auf die Existenz eines mentalen Zahlenstrahls zurückgeführt. Es wurde herausgearbeitet, dass der mentale Zahlenstrahl nicht-linear komprimiert ist (z. B. Nieder & Miller, 2003) und eine links-rechts-Orientierung aufweist (Dehaene et al., 1993). Außerdem deuten die unterschiedlichsten experimentellen Versuchsanordnungen daraufhin, dass die mentale Repräsentation einer numerischen Größe automatisch aktiviert wird (z. B. Duncan & McFarland, 1980; Henik & Tzelgov, 1982). Des Weiteren wird der semantische Kongruenzeffekt auf die relative Position der numerischen Größe auf dem mentalen Zahlenstrahl zurückgeführt (Birnbaum & Jou, 1990; Dehaene, 1989; Jamieson & Petrusic, 1975).

Die weiterführende Frage lautet nun, wie die mentale Repräsentation negativer Zahlen beschrieben werden kann. Diese Frage wurde in den vergangenen Jahren in der Literatur nur am Rande behandelt. Der Mangel an empirischen Arbeiten zu diesem Thema kann sicherlich darauf zurückgeführt werden, dass einige führende Forscher auf dem Gebiet der mentalen Arithmetik die Möglichkeit der eigenständigen mentalen Größenrepräsentation negativer Zahlen regelrecht ablehnen. Dehaene

(1992) begründet diese Meinung damit, dass man negative Zahlen nicht „erfahren“ könne. Mit der gleichen Begründung geht DeCruz (2006) davon aus, dass der mentale Zahlenstrahl aus evolutionärer Sicht keine negativen Zahlen beinhalten kann. Dennoch schreibt sie einige Seiten später, dass „negative numbers are structured by analogy with the positives: they are represented on a mental number line that runs backward“ (S. 317) und bezieht diese Aussage auf den numerischen Distanzeffekt, der auch im negativen Zahlenbereich nachgewiesen wurde (Fischer, 2003). Mit seiner phylogenetischen Hypothese schloss sich Fischer (2003) dem Argument von Dehaene an und damit die Existenz eines mentalen Zahlenstrahls mit Ausweitung in den negativen Zahlenbereich aus. Allerdings formulierte er in seiner ontogenetischen Hypothese, dass negative Zahlen (im Vergleich zu positiven Zahlen) eine Assoziation mit ‚links‘ aufweisen, die man durch den SNARC-Effekt sichtbar machen könnte. Als Begründung führte er an, dass die räumlich-numerische Assoziation negativer Zahlen aufgrund des Mathematikunterrichts in der Schule, insbesondere durch den Umgang mit Koordinatensystemen, erlernt wurde.

Tatsächlich kommen negative Zahlen im Alltag nur selten zur Anwendung, was für oder gegen das Argument sprechen kann, die Erfahrung damit sei nicht möglich. Dennoch können die meisten Menschen entscheiden, welche von zwei negativen Zahlen die numerisch größere bzw. numerisch kleinere ist. Wenn negative Zahlen, wie von Dehaene (1992) angenommen, jedoch keine eigenständigen mentalen Größenrepräsentationen besitzen, dann steht die Frage im Raum, auf welche mentale Repräsentation während dieses numerischen Vergleiches zugegriffen wird. Dieser Frage soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit nachgegangen werden. Zunächst werden für die mentale Repräsentation negativer Zahlen zwei konkurrierende Annahmen vorgeschlagen. Daran schließt sich eine ausgiebige Diskussion der wenigen experimentellen Arbeiten auf diesem Gebiet und die Ableitung empirisch überprüfbarer Vorhersagen an.

2.4 Der numerische Vergleich negativer Zahlen

2.4.1 Annahmen zur mentalen Repräsentation negativer Zahlen

Die eigenständige mentale Größenrepräsentation negativer Zahlen ist entgegen der Aussage von Dehaene (1992) der Ausgangspunkt der **Zahlenstrahlannahme**. Die Betonung liegt auf dem Wort „eigenständig“, womit verdeutlicht werden soll, dass die mentale Größenrepräsentation der negativen Zahlen von der mentalen Größenrepräsentation der positiven Zahlen unterscheidbar ist. Die Zahlenstrahlannahme geht davon aus, dass numerische Größenvergleiche positiver und negativer Zahlen auf einem mentalen Zahlenstrahl basieren, der eine Ausweitung in den negativen Zahlenbereich, ähnlich dem in Abbildung 2.8 dargestellten, aufweist.

Der Vergleich der numerischen Größe positiver und negativer Zahlen mit absolut gleichen Werten bringt einen interessanten Aspekt mit sich. Obgleich sich die Zahlen -9 und 9 in ihrer absoluten numerischen Größe[5] nicht unterscheiden, ändert das Vorzeichen die Bedeutung der numerischen Größe einer Zahl. Im Intervall $[-9,\ldots,9]$ ist die Zahl 9 die numerisch größte Zahl, wohingegen die

[5] Der Ausdruck absolute numerische Größe bezieht sich im Folgenden stets auf den Absolutbetrag der negativen Zahl.

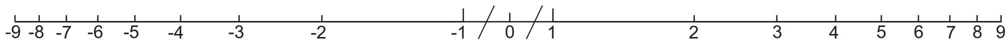


Abbildung 2.8. Der logarithmisch komprimierte mentale Zahlenstrahl mit einer Ausweitung in den negativen Zahlenbereich. Die Existenz der mentalen Repräsentation der Zahl 0 ist in der Literatur umstritten, weshalb das Intervall $[-1, \ldots, 1]$ nicht weiter spezifiziert wird. Dies ist anhand von Querstrichen gekennzeichnet.

Zahl -9 die Zahl mit dem numerisch kleinsten Wert darstellt. Bezogen auf den semantischen Kongruenzeffekt würde die Zahlenstrahlannahme deshalb vorhersagen, dass kürzere Reaktionszeiten entstehen, wenn aus zwei numerisch kleinen negativen Zahlen (z. B. -8 -9) die numerisch kleinere im Vergleich zur numerisch größeren ausgewählt werden soll. Umgekehrt müssten sich für numerisch große negative Zahlen (z. B. -2 -1) kürzere Reaktionszeiten ergeben, wenn die Instruktion lautet, die numerisch größere der beiden Zahlen zu bestimmen (siehe Tabelle 2.1). Die Zahlenstrahlannahme impliziert, dass der negative und positive Teil des mentalen Zahlenstrahls ähnliche Eigenschaften aufweist. So müssten sich numerische Distanz- und Größeneffekte aufgrund der Eigenschaft der logarithmischen Komprimierung auch für negative Zahlen zeigen lassen. Vor dem Hintergrund der räumlich-numerischen Assoziation würde die Zahlenstrahlannahme einen Vorteil mit der linken Antwortseite für numerisch kleine negative Zahlen und einen Vorteil mit der rechten Antwortseite für numerisch große negative Zahlen vorhersagen.

Schon in Lochmann (2005) wurde vorgeschlagen, dass für negative Zahlen keine eigenständigen Größenrepräsentationen existieren und während der Verarbeitung negativer Zahlen auf die mentale Größenrepräsentationen der positiven Zahlen zugegriffen wird. Shaki und Petrusic (2005) nehmen genau das in ihrer *magnitude-polarity hypothesis* an. In dieser Hypothese werden zwei getrennte Dimensionen, numerische Größe und Polarität (negativ vs. positiv), beschrieben. Die Dimension numerische Größe ist die dominante Dimension, die in jeder Aufgabe mit numerischem Material zuerst aktiviert wird und der mentalen Größenrepräsentation positiver Zahlen entspricht. Demgegenüber erfolgt der Zugriff auf die Polarität nur dann, wenn die Aufgabe es verlangt. So beschreiben die Autoren, dass beim numerischen Vergleich negativer Zahlen „magnitude information is accessed first, and polarity is not processed until the comparison has been completed“ (S. 933). Leider spezifizieren die Autoren nicht, was genau die Verarbeitung der Polarität bewirkt und wie letztendlich die korrekte Antwortauswahl beim numerischen Vergleich zweier negativer Zahlen vonstatten geht.

Weitaus spezifischer ist die von Lochmann (2005) postulierte **Strategieannahme**, in der für den numerischen Vergleich zweier negativer Zahlen die Anwendung zweier möglicher Strategien vorgeschlagen wurde: die Strategie der Reaktionsumkehr und die Strategie der Instruktionsumkehr. Für beide Strategien lautet die Annahme, dass das numerische Urteil auf den Absolutwerten der negativen Zahlen basiert. Beide Strategien sollen am Beispiel des Zahlenpaares -7 -1 und der Instruktion, die numerisch größere Zahl zu bestimmen, erläutert werden. Wird die *Strategie der Reaktionsumkehr* verwendet, so würde aus dem Zahlenpaar -7 -1 zunächst die absolut größere Zahl ($|-7|$) ausgewählt werden. Da diese Auswahl jedoch zu einem linken Tastendruck und damit zur falschen Antwort führen würde, muss in einem zweiten Schritt die Antwortseite (Reaktion) umgekehrt werden, was zu dem korrekten rechten Tastendruck führt. Die *Strategie der Instruktionsumkehr* besagt, dass die Versuchsperson mit Präsentation eines negativen Zahlenpaares eine Umkehr der Instruktion vornimmt. Die korrekte Auswahl der numerisch größeren Zahl des negativen Zahlenpaares −7 −1 geschieht durch die Bestimmung der absolut kleineren der beiden Zahlen ($|-1|$). Mit beiden Strategien würden höhere Reaktionszeiten für negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren vorhergesagt werden. Bei der Strategie der Reaktionsumkehr wird zusätzliche Verarbeitungszeit für die Umkehr der Antwort benötigt. Auch für die Strategie der Instruktionsumkehr könnte das Umkehren der Instruktion bei negativen Zahlenpaaren einen höheren kognitiven Aufwand bedeuten und dementsprechend zu erhöhten Reaktionszeiten führen. Da mit beiden Strategien die korrekte Antwort anhand der Absolutwerte der beiden Zahlen bestimmt wird, stimmen die Vorhersagen für den SNARC- sowie den numerischen Distanz- und Größeneffekt überein. Für den SNARC-Effekt ergibt sich, dass er vom Absolutbetrag der präsentierten Zahl abhängig ist. Gleichermaßen sollten sich für positive und negative Zahlenpaare ähnliche Ergebnisse zum numerischen Distanz- bzw. Größeneffekt zeigen lassen, da die numerischen Urteile jeweils auf den analogartigen mentalen Größenrepräsentationen der positiven Zahlen basieren. Der semantische Kongruenzeffekt könnte dazu verwendet werden, eine Entscheidung für die Gültigkeit einer der beiden Strategieannahmen zu treffen. In Tabelle 2.1 ist eine Gegenüberstellung der Reaktionszeitvorhersagen für den semantischen Kongruenzeffekt getrennt für die Zahlenstrahlannahme sowie die beiden Strategienannahmen zu finden. Gemäß dem semantischen Kongruenzeffekt kann aus zwei numerisch kleinen positiven Zahlen (z. B. 1 2) schneller die numerisch kleinere als die nu-

Tabelle 2.1

Vorhersagen der Ergebnisse zum semantischen Kongruenzeffekt getrennt für die einzelnen Annahmen am Beispiel zweier negativer Zahlenpaare

Zahlenpaar	Größenstatus	vom VL vorgegebene Instruktion	Verhalten der Vp	Vorhersage
	Zahlenstrahlannahme:			
−1 −2	num. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt num. kleinere	$RT^a_{kl} > RT^b_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt num. größere	
	Strategie der Reaktionsumkehr:			
	abs. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. kleinere*	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. größere*	
	Strategie der Instruktionsumkehr:			
	abs. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. größere	$RT_{kl} > RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. kleinere	
	Zahlenstrahlannahme:			
−8 −9	num. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt num. kleinere	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt num. größere	
	Strategie der Reaktionsumkehr:			
	abs. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. kleinere*	$RT_{kl} > RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. größere*	
	Strategie der Instruktionsumkehr:			
	abs. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. größere	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. kleinere	

Anmerkung. VL = Versuchsleiter, Vp = Versuchsperson, num. = numerisch, abs. = absolut, * = mit anschließender Umkehr der Reaktion, *a*: RT_{kl} = Reaktionszeit unter der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl“, *b*: RT_{gr} = Reaktionszeit unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“.

merisch größere Zahl bestimmt werden. Auf den Absolutbetrag einer Zahl übertragen, sollte aus zwei absolut kleinen negativen Zahlen (z. B. −1 −2) schneller die absolut kleinere im Vergleich zur absolut größeren Zahl ausgewählt werden können. Die Versuchsperson bestimmt genau dann die absolut kleinere Zahl zweier negativer Zahlen, wenn sie (a) die numerisch kleinere Zahl bestimmen soll und dazu die Strategie der Reaktionsumkehr anwendet oder (b) wenn sie die numerisch größere Zahl bestimmen soll und dazu die Strategie der Instruktionsumkehr einsetzt. Umgekehrt sollte aus zwei absolut großen negativen Zahlen (z. B. −8 −9) schneller die absolut größere im Vergleich zur absolut kleineren bestimmt werden können. Die Auswahl der absolut größeren zweier negativer Zahlen erfolgt dann, wenn (a) die numerisch größere Zahl ausgewählt werden soll und dazu die Strategie der Reaktionsumkehr anwendet wird oder (b) die numerisch kleinere Zahl bestimmt werden soll und dazu die Strategie der Instruktionsumkehr zum Einsatz kommt. Damit ergeben sich bei Präsentation numerisch kleiner negativer Zahlen für die Strategie der Reaktionsumkehr im Vergleich zur Strategie der Instruktionsumkehr entgegengesetzte Vorhersagen. Gleiches trifft auf die Präsentation numerisch großer negativer Zahlen zu. Somit ist mit dem semantischen Kongruenzeffekt eine Entscheidung zugunsten einer der beiden Strategieannahmen gegeben. Tabelle 2.1 soll des Weiteren verdeutlichen, dass die Vorhersagen für die Zahlenstrahlannahme und die Strategie der Instruktionsumkehr in die gleiche Richtung gehen, womit eine Entscheidung zugunsten einer der beiden nicht möglich ist.

2.4.2 Empirische Befundlage zum numerischen Vergleich negativer Zahlen

Die erste und bisher auch einflussreichste Arbeit zur Frage der mentalen Repräsentation negativer Zahlen stammt von Fischer (2003) und beschäftigt sich mit dem SNARC-Effekt und dem Einfluss der Anordnung zweier Zahlen eines Zahlenpaares. Er bot alle Zahlenpaare im Bereich $[-9,\dots,9]$ mit einer numerischen Differenz von $d = 5$ dar (z. B. 9 4, −7 −2, 0 5). Jede Versuchsperson absolvierte zwei Blöcke, wobei es in einem Block die numerisch größere Zahl und in einem anderen Block die numerisch kleinere Zahl per Tastendruck auszuwählen galt. Dies ermöglichte die Untersuchung des SNARC-Effekts. Die Zahlenpaare wurden des Weiteren aufgrund der Anordnung der beiden Zahlen in einem Zahlenpaar hinsichtlich zweier Variablen unterteilt: numerische und absolute Kongruenz. Die Anordnung der beiden Zahlen eines numerisch kongruenten Zahlenpaares (N^+) entspricht der Anordnung der numerischen Größenrepräsentationen auf einem mentalen Zahlenstrahl mit Ausweitung in den negativen Bereich (siehe Abbildung 2.8). Dies trifft beispielsweise auf die Zahlenpaare −9 −4 oder 1 5 zu, da die numerisch kleinere Zahl links und die numerisch größere Zahl rechts steht. Absolute Kongruenz (A^+) bezieht sich auf die Absolutbeträge der beiden Zahlen eines Zahlenpaares und beinhaltet die Annahme, es gäbe keinen negativen mentalen Zahlenstrahl. Absolute Kongruenz liegt dann vor, wenn die absolut kleinere Zahl links und die absolut größere Zahl rechts steht, was auf das Zahlenpaar 4 9, aber auch auf das Zahlenpaar −3 −8 zutrifft. Diese beiden Variablen können nun kombiniert werden. So ist die Anordnung im eben genannten Zahlenpaar −3 −8 zwar absolut kongruent, jedoch numerisch inkongruent. Tabelle 2.2 gibt alle von Fischer verwendeten Zahlenpaare entsprechend der Einteilung in numerische und absolute Kongruenz wieder. Daraus geht hervor, dass es in jeder der vier Kongruenzbedingungen gemischte Zahlenpaare gibt, d. h. solche die eine positive und eine negative Zahl (bzw. die Zahl 0) enthalten. Zusätzlich verdeutlicht Tabelle 2.2, dass positive Zahlenpaare nur in den Bedingungen A^-N^- sowie A^+N^+ und negative Zahlenpaare nur in den Bedingungen A^-N^+ sowie

Tabelle 2.2

Einteilung der Zahlenpaare nach numerischer bzw. absoluter Kongruenz im Experiment von Fischer (2003), Abbildung in Anlehnung an Fischer (2003)

	N^-				N^+			
	9	4	5	0	−9	−4	−5	0
A^-	8	3	4	−1	−8	−3	−4	1
	7	2	3	−2	−7	−2	−3	2
	6	1			−6	−1		
	−4	−9	0	−5	4	9	0	5
A^+	−3	−8	1	−4	3	8	−1	4
	−2	−7	2	−3	2	7	−2	3
	−1	−6			1	6		

Anmerkung. N^- = numerisch inkongruent, N^+ = numerisch kongruent, A^- = absolut inkongruent, A^+ = absolut kongruent.

A^+N^- vorkommen.

Ein Vergleich der Reaktionszeiten positiver und negativer Zahlenpaare ergab einen Reaktionszeitvorteil für die positiven Zahlenpaare von 62 ms. Fischer konnte zeigen, dass die numerisch kongruente Bedingung (N^+) signifikant schneller als die numerisch inkongruente Bedingung (N^-) beantwortet werden kann. Allerdings betrug dieser Unterschied nur 7 ms. Auf Zahlenpaare mit einer absolut inkongruenten Anordnung (A^-) konnte hingegen 15 ms schneller geantwortet werden als auf Zahlenpaare mit einer absolut kongruenten Anordnung (A^+). Fischer interessierte sich insbesondere für die Unterscheidung zwischen A^-N^+ (rechte obere Spalte in Tabelle 2.2) und A^+N^- (linke untere Spalte in Tabelle 2.2). Seine Versuchspersonen reagierten dann schneller, wenn die beiden zu beurteilenden Zahlen numerisch kongruent im Vergleich zu absolut kongruent angeordnet waren. Da die beiden Bedingungen hauptsächlich negative Zahlenpaare enthielten, interpretierte er dieses Ergebnis als Beleg eines negativen mentalen Zahlenstrahls. Des Weiteren betrachtete Fischer für jede der vier Zahlenpaararten den SNARC-Effekt, in dem er pro Zahlenpaar die Reaktionszeitdifferenz mit der rechten und linken Hand (dRT) bildete und gegen die Summe der beiden Zahlen abtrug. Mittels Regressionsanalyse konnte der SNARC-Effekt nur für die Bedingung A^+N^+ statistisch abgesichert werden. Für die anderen drei Zahlenpaararten unterschied sich der Anstieg der Regressionsgeraden nicht signifikant von Null. Dennoch interpretierte Fischer die Daten als Beleg für einen negativen mentalen Zahlenstrahl.

Die Kritik an diesem Experiment ist unumgänglich. Prinzipiell muss die Frage gestellt werden, weshalb Zahlenpaare, deren Elemente gemäß oder entgegen einem mentalen Zahlenstrahl angeordnet sind, schneller bzw. langsamer beantwortet werden sollten. Turconi, Campbell und Seron (2006) belegten mit einer numerischen Vergleichsaufgabe, dass die Reaktionszeiten von der Anordnung zweier positiver Zahlen in einem Zahlenpaar unbeeinflusst bleiben. Es spielt demzufolge keine Rolle, ob die numerisch kleinere Zahl links oder rechts steht. Dies wird auch anhand der geringen Reaktionszeitunterschiede in den Daten von Fischer (2003) deutlich. Des Weiteren reagierten Versuchspersonen am schnellsten in der Bedingung A^-N^-, was nicht mit der von Fischer

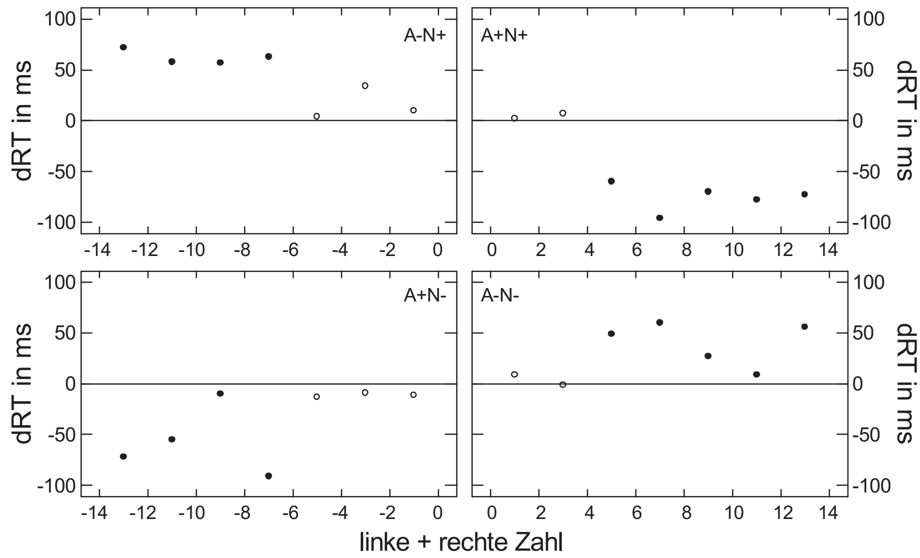


Abbildung 2.9. Darstellung der Reaktionszeitdifferenz aus rechter und linker Hand (dRT) als Funktion der Summe der beiden Zahlen eines Zahlenpaares getrennt für die vier Bedingungen nach Fischer (2003). Die Zahlenpaare wurden nach numerischer Kongruenz (N^+) bzw. Inkongruenz (N^-) sowie absoluter Kongruenz (A^+) bzw. Inkongruenz (A^-) unterteilt. Gefüllte Symbole entsprechen den Datenpunkten positiver und negativer Zahlenpaare, ungefüllte Symbole geben die Datenpunkte gemischter Zahlenpaare wieder.

angenommenen Bedeutsamkeit der Anordnung der Zahlen in einem Zahlenpaar in Einklang zu bringen ist. Die Hauptkritik bezieht sich jedoch auf die Auswahl der Zahlenpaare und deren Zuordnung zu den entsprechenden Kongruenzbedingungen. Fischer stellte die mittleren Reaktionszeiten aller Zahlenpaare tabellarisch zur Verfügung. Beim Vergleich der mittleren Reaktionszeiten gemischter Zahlenpaare stellt man fest, dass darauf im Mittel gleich schnell reagiert werden kann. Genau dieser Umstand lässt die Ergebnisse zum SNARC-Effekt in völlig neuem Licht erscheinen, da auch die dRT für gemischte Zahlenpaare kaum verschieden von Null sind[6]. Zur Veranschaulichung soll Abbildung 2.9 hilfreich sein. Lässt man die Reaktionszeiten auf gemischte Zahlenpaare unberücksichtigt, so würden alle vier Anstiege – per Augenmaß – kaum verschieden von Null sein. Dennoch zeigt sich auch mit Ausschluss der gemischten Zahlenpaare ein Einfluss der Antworthand. Innerhalb der positiven Zahlenpaare kann in der Bedingung A^+N^+ schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand reagiert werden. Umgekehrt erfolgt die Reaktion auf positive Zahlenpaare in der Bedingung A^-N^- schneller mit der linken Hand. Für die negativen Zahlenpaare ergibt sich ein ähnlicher Effekt. In der A^-N^+-Bedingung erfolgt die Reaktion schneller mit der linken Hand, in der A^+N^--Bedingung schneller mit der rechten Hand. Während dieser Zusammenhang von Shaki und Petrusic (2005) auf den semantischen Kongruenzeffekt zurückgeführt wird[7],

[6] Selbstverständlich können die Daten nur deskriptiv analysiert werden.

[7] Laut Shaki und Petrusic (2005) kann auf positive Zahlenpaare der Art A^+N^+ deshalb schneller mit der rechten Hand reagiert werden, weil auf die numerisch große Zahl 9 reagiert wird, was von den Autoren als semantisch kongruente Reaktion bezeichnet wird. Die Reaktion mit der linken Hand auf die numerisch kleinere Zahl des Zahlenpaares wird als semantisch inkongruent beschrieben, da in dem Zahlenpaar eine numerisch große Zahl enthalten ist. Der semantische Kongruenzeffekt bezieht sich jedoch auf die numerische Größe *beider* Zahlen, d. h. beide Zahlen sollten numerisch klein bzw. numerisch groß sein, um den Effekt der Instruktion zeigen zu können.

kann dieses Ergebnis auch damit erklärt werden, dass auf positive Zahlen generell schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ reagiert werden kann (Banks et al., 1976; Parkman, 1971; Shoben et al., 1989). In beiden Bedingungen der positiven Zahlen kann mit der Antworthand schneller reagiert werden, die verwendet werden muss, um die numerisch größere Zahl auszuwählen. Bei negativen Zahlenpaaren hingegen erfolgt die Antwortabgabe schneller mit der Antwortseite, mit der die numerisch kleinere Zahl ausgewählt wird. Dieser Reaktionszeitvorteil der ‚kleiner‘-Instruktion bei negativen Zahlenpaaren legt den interessanten Aspekt nahe, dass zwei negative Zahlen tatsächlich als ‚kleine‘ numerische Größen verarbeitet werden und liefert somit einen ersten Hinweis auf die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls.

Fischer und Rottmann (2005) gingen der Ausweitung des mentalen Zahlenstrahls in den negativen Zahlenbereich mit einem typischen Versuchsaufbau zum SNARC-Effekt nach. In unterschiedlichen Sitzungsblöcken wurden Zahlen aus drei Zahlenbereichen dargeboten: $[0,\ldots,9]$, $[-9,\ldots,0]$ sowie $[-4,\ldots,5]$. Dabei galt es in jedem Durchgang zu entscheiden, ob die präsentierte Zahl gerade oder ungerade ist. Die Zahlenstrahlannahme würde kürzere Reaktionszeiten mit der linken Hand auf numerisch kleine negative Zahlen (z. B. −9, −8) vorhersagen. Mit Ansteigen der numerischen Größe negativer Zahlen sollte sich zunehmend ein Reaktionszeitvorteil der rechten Antworthand ergeben. Dies konnte von den Autoren nicht belegt werden, da der SNARC-Effekt entgegen der Zahlenstrahlannahme nicht von der numerischen sondern von der absoluten Größe der Zahlen abhängig war. Dieses Ergebnis erhielten die Autoren auch dann, wenn positive und negative Zahlen in einem Block dargeboten wurden. Ein Einwand gegen dieses Vorgehen könnte lauten, dass das Vorzeichen zur Beurteilung der Parität völlig irrelevant ist. Dennoch schließt dieses Ergebnis die Hypothese, negative Zahlen aktivieren automatisch ihre numerische Größenrepräsentation auf dem negativen mentalen Zahlenstrahl, aus. Dem Einwand der Irrelevanz des Vorzeichens für Paritätsurteile begegneten Fischer und Rottmann mit einem zweiten Experiment. Erneut wurden positive und negative Zahlen präsentiert und es sollte entschieden werden, ob die präsentierte Zahl kleiner oder größer als Null ist. Die Auswertung des numerischen Distanzeffekts brachte nur für positive Zahlen ein signifikantes Ergebnis. Für negative Zahlen konnte kein Hinweis auf den numerischen Distanzeffekt gefunden werden. Bei genauerer Betrachtung der entsprechenden Abbildung ist jedoch auffällig, dass der Distanzeffekt innerhalb des positiven Zahlenbereichs nur für Reaktionen mit der rechten Hand auftritt. Dies wurde von den Autoren jedoch nicht inferenzstatistisch überprüft. Die regressionsanalytische Auswertung des SNARC-Effekts erbrachte weder für den negativen noch für den positiven Zahlenbereich einen signifikanten Anstieg. Allerdings ergab sich für die positiven Zahlen ein Vorteil mit der rechten gegenüber der linken Antworthand. Wenn man bedenkt, dass die Aufgabe anhand der Klassifizierung der Vorzeichen gelöst werden kann, sind die Ergebnisse wenig überraschend.

Auch Nuerk, Iversen und Willmes (2004) gelangten zu ähnlichen Ergebnissen und Schlussfolgerungen wie Fischer und Rottmann (2005, Exp. 1). Neben Zahlen in unterschiedlichen Darstellungsformaten (Zahlwörter und römische Zahlsymbole) wurden in unterschiedlichen Blöcken auch negative bzw. positive Zahlen dargeboten. Anhand von Paritätsurteilen sollte u. a. der Frage nachgegangen werden, wie die räumlich-numerische Assoziation negativer Zahlen beschaffen ist. Die Ergebnisse unterschieden sich kaum von den Ergebnissen von Fischer und Rottmann (Exp. 1). Der SNARC-Effekt trat bei negativen und positiven Zahlen unabhängig vom Vorzeichen auf. Absolut große Zahlen wurden mit ‚rechts‘ und absolut kleine Zahlen mit ‚links‘ assoziiert.

Ein weiteres Experiment stammt von Shaki und Petrusic (2005), die sich den SNARC-Effekt und den semantischen Kongruenzeffekt zunutze machten. Die verwendeten Zahlenpaare bestanden entweder aus kleinen negativen Zahlen (−9, −8, −7, −6), großen negativen Zahlen und der Null (−3, −2, −1, 0), kleinen positiven Zahlen und der Null (0, 1, 2, 3) oder großen positiven Zahlen (6, 7, 8, 9). Es wurden nur Zahlenpaare mit numerischer Differenz $d = 1$ verwendet, was pro Zahlenbereich zu sechs Zahlenpaaren führte (z. B. 0 1, 1 0, 1 2, 2 1, 2 3, 3 2). Vor jedem Durchgang wurde ein Instruktionscue in Form der Wörter *smaller* bzw. *larger* präsentiert, der angab, aus dem nachfolgenden Zahlenpaar die numerisch kleinere bzw. größere Zahl auszuwählen. Eine weitere Variation bildete die geblockte vs. gemischte Präsentation positiver und negativer Zahlenpaare. So wurden in einem Teil der Blöcke nur positive Zahlen dargeboten, in einem anderen nur negative. Schließlich gab es Blöcke, in denen positive und negative Zahlenpaare gemischt präsentiert wurden. Mit diesem experimentellen Vorgehen konnte überprüft werden, welchen Einfluss die gemischte Präsentation positiver und negativer Zahlenpaare in einem Block im Vergleich zur alleinigen Präsentation negativer Zahlenpaare auf die Verarbeitung negativer Zahlen ausübt. Insgesamt produzierten Versuchspersonen in der gemischten Bedingung höhere Reaktionszeiten als in der geblockten Bedingung und benötigten für die Beantwortung negativer Zahlenpaare mehr Zeit als für die Beantwortung positiver Zahlenpaare. Hinsichtlich des SNARC-Effekts bei negativen Zahlenpaaren gab es zwischen der geblockten und gemischten Bedingung gravierende Unterschiede. Wurden positive und negative Zahlenpaare getrennt dargeboten, so trat der SNARC-Effekt unabhängig vom Vorzeichen auf. Auf numerisch kleine positive und numerisch große negative Zahlenpaare (z. B. 1 2 und −1 −2) erfolgte die Reaktion schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand. Wurden numerisch große positive bzw. numerisch kleine negative Zahlenpaare präsentiert (z. B. 8 9 und −8 −9), so konnte schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand reagiert werden. Dazu muss angemerkt werden, dass die Determinationskoeffizienten mit $R^2 = .974$ für die negativen Zahlenpaare und $R^2 = .939$ für die positiven Zahlenpaare äußert beeindruckend sind. Bei gemeinsamer Präsentation negativer und positiver Zahlenpaare in einem Block änderte sich das Datenmuster für die negativen Zahlen jedoch völlig. Nun konnte auf alle negativen Zahlenpaare schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand reagiert werden. Leider vermisst man in der Auswertung eine getrennte Regressionsanalyse für positive und negative Zahlenpaare. Stattdessen rechneten Shaki und Petrusic eine lineare Regression über beide Zahlenpaararten hinweg und interpretierten den signifikant negativen Anstieg der resultierenden Regressionsgeraden als Beleg für die Ausweitung des mentalen Zahlenstrahls in den negativen Bereich. Auch wenn die Auswertung pro Zahlenpaarart überzeugender gewesen wäre, liefert dieses Ergebnis dennoch einen Hinweis darauf, dass negative Zahlen bei zusätzlicher Präsentation positiver Zahlen mit ‚links' assoziiert werden. Zum semantischen Kongruenzeffekt kann gesagt werden, dass sowohl in der gemischten als auch in der geblockten Bedingung schneller geantwortet wurde, wenn aus zwei positiven Zahlen die numerisch größere im Vergleich zur numerisch kleineren Zahl bestimmt werden sollte. Interessanterweise entstand dieses Ergebnis auch bei numerisch kleinen positiven Zahlen, was im klaren Widerspruch zu den Ergebnissen von Banks et al. (1976) steht. Für die negativen Zahlenpaare wurden, wie auch schon bei Fischer (2003), schnellere Reaktionen für die Auswahl der numerisch kleineren zweier negativer Zahlen abgegeben. Dieses Ergebnis bestätigt ein weiteres Mal die Annahme, dass negative Zahlen im Vergleich zu positiven Zahlen als kleine numerische Größen verarbeitet werden. Allerdings hätten sich mit den Überlegungen aus Tabelle 2.1 unterschiedliche Effekte der Instruktion auf numerisch kleine und große negative Zahlenpaare ergeben müssen. Dieser Aspekt wird in einem späteren Teil der Arbeit erneut aufgegriffen.

Ganor-Stern und Tzelgov (2008, Exp. 1) beschäftigten sich mit der mentalen Repräsentation zweistelliger positiver und negativer Zahlen. Da allein aus methodischer Sicht zahlreiche Probleme vorhanden sind, wird darauf nur kurz eingegangen. Weiterhin bezieht sich die Kritik in gleicher Weise auf positive und negative Zahlenpaare, weshalb sich die nachfolgenden Bemerkungen auf die positiven Zahlenpaare beschränken. Als Reizmaterial wurden neben negativen Zahlenpaaren zwölf positive Zahlenpaare mit $d = 5$ bzw. $d = 8$ ausgewählt, die in klein (3 8, 5 13, 7 12, 11 19), mittel (38 46, 41 49, 53 58, 52 57) und groß (71 76, 81 89, 86 94, 88 93) klassifiziert wurden. Die Autoren ließen numerische Vergleichsurteile abgeben und fanden die kürzesten Reaktionszeiten für kleine Zahlenpaare, wobei sich die Reaktionszeiten zwischen mittleren und großen Zahlenpaaren nicht unterschieden. Die Autoren interpretierten dieses Ergebnis als numerischen Größeneffekt, je größer die beiden Zahlen eines Zahlenpaares bei konstanter numerischer Differenz sind, desto fallen die Reaktionszeiten aus. Allerdings gibt es bei den kleinen Zahlenpaaren zwei Zahlenpaare, die aus einer einstelligen und einer zweistelligen Zahl bestehen. Allein dieses Merkmal könnte zu den kürzeren Reaktionszeiten geführt haben, womit eine eindeutige Interpretation nicht mehr möglich ist. Zudem wird bisher noch kontrovers diskutiert, inwieweit zweistellige Zahlen überhaupt als Teil des mentalen Zahlenstrahls anzusehen sind (Dehaene et al., 1990; Hinrichs et al., 1981; Nuerk, Weger & Willmes, 2001). Auch wenn die Autoren diesen letzten Punkt ansprechen und ihre Fragestellung interessant ist, scheint dieses Paradigma zur Untersuchung der mentalen Repräsentation negativer Zahlen nicht angemessen.

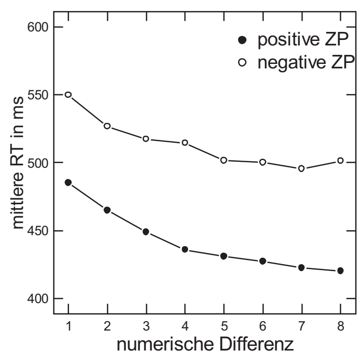


Abbildung 2.10. Der numerische Distanzeffekt für positive und negative Zahlenpaare (ZP) nach Lochmann (2005).

Lochmann (2005) untersuchte mit einem klassischen numerischen Vergleichsparadigma, inwieweit sich numerische Distanz- und Größeneffekte auch im Bereich der negativen Zahlen zeigen lassen. Dazu wurden den Versuchspersonen alle 288 Zahlenpaare im Bereich $[-9,\ldots,-1,1,\ldots,9]$ präsentiert, die dem Absolutbetrag nach keine zwei gleichen Zahlen enthielten. Die Aufgabe bestand bei jedem präsentierten Zahlenpaar darin, die numerisch größere der beiden Zahlen per Tastendruck auszuwählen. Es zeigte sich, dass bei Präsentation eines negativen im Vergleich zu einem positiven Zahlenpaar signifikant mehr Zeit benötigt wurde. Die numerischen Distanz- und Größeneffekte konnten für den positiven Zahlenbereich repliziert werden. Auch im negativen Zahlenbereich ließen sich beide Effekte nachweisen. Abbildung 2.10 ist zu entnehmen, dass der numerische Distanzeffekt der beiden Zahlenpaararten vergleichbar ist, woraus geschlussfolgert werden kann, dass beiden ähnliche Verarbeitungsprozesse zugrunde liegen. Der unabhängig von der Art des Zahlenpaares (negativ vs. positiv) aufgetretene numerische Distanzeffekt kann gut mit der Zahlenstrahlannahme durch identische Eigenschaften der negativen und positiven Seite des Zahlenstrahls erklärt werden. Gleichermaßen könnte dieses Ergebnis durch die Verwendung einer der beiden vorgeschlagenen Strategien entstanden sein. Bei beiden Strategien würde der Distanzeffekt die nicht-lineare Komprimierung des (positiven) mentalen Zahlenstrahls widerspiegeln. Für die Umkehr der Instruktion könnte eine konstante Zeit angenommen werden, was die erhöhten Reaktionszeiten auf negative Zahlenpaare erklärt. Genauso könnte die Strategie der Reaktionsumkehr höhere Reaktionszeiten für negative Zahlenpaare vorhersagen, wenn für die Umkehr der Reaktion eine konstante Zeit angenommen wird.

Eine Besonderheit des Experiments von Lochmann (2005) bestand in der systematischen Untersuchung gemischter Zahlenpaare. Insbesondere der Einfluss der numerischen bzw. absoluten Differenz sollte die Entscheidung für oder gegen die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls ermöglichen. Die numerische Differenz bezog sich auf den Absolutbetrag der Differenzen; Beispielsweise hat das Zahlenpaar −5 3 eine numerische Differenz von 8, da $|(-5)-(+3)|=8$. Ein Einfluss der numerischen Differenz würde für die Aktivierung der mentalen Repräsentation – der negativen und positiven Zahl – auf beiden Seiten des mentalen Zahlenstrahls sprechen. Die absolute numerische Differenz wurde als Differenz der Absolutbeträge definiert. Daher erhält man für das Zahlenpaar −5 3 eine absolute numerische Differenz von 2, da $|-5|-|+3|=2$. Die Abhängigkeit der Reaktionszeiten von der absoluten Differenz würde als Beleg für die Strategieannahme gewertet. Für die gemischten Zahlenpaare ergaben sich im Vergleich zu negativen oder positiven Zahlenpaaren signifikant kürzere Reaktionszeiten. Überraschend war jedoch das Ausbleiben des als robust geltenden numerischen Distanzeffekts. Weder unter Berücksichtigung der absoluten numerischen Differenz noch unter Berücksichtigung der numerischen Differenz ließ sich ein Einfluss auf die Reaktionszeiten nachweisen. Als mögliche Erklärung wurde die Klassifizierung der Zahlenpaare anhand der Vorzeichen in Erwägung gezogen.

3 Fragestellung

Die Darstellung der wenigen experimentellen Arbeiten, die negative Zahlen als Stimulusmaterial enthalten, sollte verdeutlichen, dass die Frage nach der mentalen Repräsentation negativer Zahlen bisher nicht eindeutig beantwortet werden kann. Die Ergebnisse zur klassischen SNARC-Aufgabe mittels Paritätsaufgaben (Fischer & Rottmann, 2005; Nuerk et al., 2004) scheinen für die Beantwortung der Fragestellung wenig angemessen, da für die Beurteilung der Parität das Vorzeichen nicht ausschlaggebend ist. Sofern ein negativer mentaler Zahlenstrahl existiert, belegen die Ergebnisse dennoch, dass negative Zahlen ihre mentale Größenrepräsentation nicht automatisch aktivieren. Die Ergebnisse zum numerischen Distanzeffekt von Lochmann (2005) deuten darauf hin, dass negativen und positiven Zahlen ähnliche Prozesse zugrunde liegen. Ferner sprechen die Ergebnisse von Fischer (2003) und Shaki und Petrusic (2005) zum semantischen Kongruenzeffekt dafür, dass negative im Vergleich zu positiven Zahlen als kleine numerische Größen verarbeitet werden. Die Kritik zur Auswahl der Zahlenpaare im Experiment von Fischer lässt eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse zum SNARC-Effekt für negative Zahlen offen. Demgegenüber finden Shaki und Petrusic einen von der numerischen Größe abhängigen SNARC-Effekt für negative Zahlen, wenn in einem Block negative und positive Zahlenpaare präsentiert werden. Dieses Ergebnis erfährt jedoch eine Einschränkung, da der SNARC-Effekt vom Absolutbetrag der Zahlen abhängt, wenn in einem Block ausschließlich negative Zahlenpaare präsentiert werden. Die räumlich-numerische Assoziation negativer Zahlen ist somit keineswegs geklärt.

Mit der Zahlenstrahlannahme wird postuliert, dass negative Zahlen eigenständige mentale Größenrepräsentationen besitzen und der mentale Zahlenstrahl in den negativen Bereich fortgesetzt wird. Mit der Formulierung der Strategieannahme wird die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls abgelehnt. Vielmehr wird angenommen, dass beim numerischen Vergleich negativer Zahlen entsprechende Strategien zur Auswahl der korrekten Antwort zur Anwendung kommen. Dazu erfolgt die Unterscheidung zwischen der Strategie der Reaktionsumkehr und der Strategie der Instruktionsumkehr. Bei beiden basiert das numerische Urteil auf den Absolutwerten der negativen Zahlen, was wiederum den Zugriff auf die mentale Repräsentation der positiven Zahlen impliziert. Reaktionsumkehr bezieht sich auf die Umkehr der anfänglich ausgewählten Reaktion, Instruktionsumkehr hingegen auf die Umkehr der vom Versuchsleiter vorgegebenen Instruktion bei Präsentation eines negativen Zahlenpaares. Die bisherige Datenlage erlaubt keine Entscheidung bzgl. der Gültigkeit einer der beiden Annahmen.

Die vorliegende Dissertation verfolgt das Ziel, die mentale Repräsentation negativer Zahlen anhand unterschiedlicher Effekte beim numerischen Vergleich weiter zu eruieren. In allen Experimenten wird dabei auf das numerische Vergleichsparadigma zurückgegriffen. In den Experimenten

1–3 soll der SNARC-Effekt näher untersucht werden. Dazu wird das Paradigma des numerischen Vergleiches mit einer Standardzahl verwendet. Experiment 4 stellt ein Kontrollexperiment dar, mit dessen Hilfe die Annahme einer natürlichen Zuordnung von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' untersucht wird. Der numerische Vergleich zweier gleichzeitig präsentierter Zahlen kommt in den Experimenten 5–8 zum Einsatz. Dabei liegt der Fokus in Experiment 5 auf dem Größenkongruenzeffekt. In den Experimenten 6 und 8 wird überprüft, ob es sich bei der möglicherweise zum Einsatz kommenden Strategie um eine verbale Selbstinstruktion handelt. Experiment 7 dient der Überprüfung des Beitrages gemischter Zahlenpaare auf den Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren. Das Hauptaugenmerk liegt in allen Experimenten auf der Unterscheidung der beiden konkurrierenden Annahmen: Existiert ein mentaler Zahlenstrahl mit Ausweitung in den negativen Zahlenbereich oder kommen beim numerischen Vergleich negativer Zahlen Strategien zur Anwendung?

4 Experimenteller Teil

4.1 Experiment 1: Der SNARC-Effekt

4.1.1 Fragestellung

Im Abschnitt 2.2.3 wurde ausführlich auf den momentanen Forschungsstand zum SNARC-Effekt eingegangen. Dieser Effekt beschreibt das Phänomen, dass numerisch kleine Zahlen (z. B. 1) eher mit ‚links' und numerisch große Zahlen (z. B. 9) eher mit ‚rechts' assoziiert sind. Mit den meisten der bisher publizierten Experimente, die negative Zahlen als Stimulusmaterial verwendeten (Fischer, 2003; Fischer & Rottmann, 2005; Shaki & Petrusic, 2005) sollte die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls anhand der räumlich-numerischen Assoziation belegt werden. Leider sind die Ergebnisse dazu recht uneindeutig.

Fischer und Rottmann (2005, Exp. 1) verwendeten das typische SNARC-Paradigma mit positiven und negativen Zahlen. Es zeigte sich, dass für den SNARC-Effekt der Absolutbetrag der Zahlen ausschlaggebend war. Die Annahme eines negativen Zahlenstrahls kann mit diesem Ergebnis dennoch beibehalten werden, da für die Beurteilung des gerade-ungerade-Status das Vorzeichen der Zahl irrelevant ist. In ihrem zweiten Experiment ließen Fischer und Rottmann Versuchspersonen negative und positive Zahlen anhand der Größe zur Zahl Null (< 0 vs. > 0) klassifizieren. Im negativen Zahlenbereich gab es keinen signifikanten Reaktionszeitunterschied zwischen Antworten, die mit der linken oder rechten Hand erfolgten. Auf positive Zahlen wurde dann am schnellsten reagiert, wenn die rechte Antwortseite für das Urteil verwendet wurde. Shaki und Petrusic (2005) griffen auf das numerische Vergleichsparadigma zurück, bei dem aus zwei präsentierten Zahlen die numerisch größere bzw. numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden sollte. Sie zeigten, dass auf Zahlenpaare, die aus zwei numerisch kleinen Zahlen bestanden (z. B. 2 3) schneller mit der linken und auf Zahlenpaare, die aus zwei numerisch großen Zahlen bestanden (z. B. 7 9) schneller mit der rechten Antwortseite reagiert wurde. Entsprechend fanden sie bei Darbietung negativer Zahlenpaare eine Assoziation mit links für Zahlenpaare mit numerisch kleinen Zahlen (z. B. −9 −8) und eine Assoziation mit rechts für Zahlenpaare mit numerisch großen Zahlen (z. B. −1 −2). Voraussetzung dafür war jedoch die gemeinsame Präsentation negativer und positiver Zahlenpaare in einem Block. Dies könnte durchaus als Beleg für die Ausweitung des mentalen Zahlenstrahls in den negativen Zahlenbereich gewertet werden. Die ausschließliche Darbietung negativer Zahlenpaare in einem Block führte jedoch zu einem SNARC-Effekt, der nur noch von der absoluten numerischen Größe abhängig war. Dieses Ergebnis ist mit der Zahlenstrahlannahme unvereinbar.

In dem nun folgenden Experiment bildet der numerische Vergleich mit einer Standardzahl einen Ansatz zur Untersuchung der räumlich-numerischen Assoziation negativer Zahlen. In diesem Paradigma werden Zahlen einzeln dargeboten und es soll jeweils entschieden werden, ob die Zahl numerisch kleiner oder größer als eine vorgegebene Standardzahl (z. B. 5) ist. Durch die Variation der Antwortseite, mit der auf numerisch kleine und große Zahlen reagiert wird, erhält man eine Möglichkeit, den SNARC-Effekt zu überprüfen. Die wenigen dazu berichteten Ergebnisse für den positiven einstelligen Zahlenbereich kommen nicht alle zum gleichen Ergebnis. Während Ito und Hatta (2004) den SNARC-Effekt in einem numerischen Vergleichsexperiment mit Standard 5 nicht zeigen konnten, ergab sich der gewohnte SNARC-Effekt mit eben diesem Paradigma in zahlreichen anderen Untersuchungen (Bull, Marschark & Blatto-Vallee, 2005; Gevers, Verguts et al., 2006; Nuerk et al., 2005). Auf Zahlen kleiner dem Standard 5 konnte schneller mit der linken Hand und auf Zahlen größer dem Standard 5 schneller mit der rechten Hand reagiert werden. Im Gegensatz zu den unterschiedlichen Ergebnissen zum SNARC-Effekt berichteten alle eben genannten Autoren das Vorhandensein des numerischen Distanzeffekts: Je größer die numerische Differenz von Vergleichs- und Standardzahl war, desto schneller konnte das numerische Urteil abgegeben werden.

Zur Untersuchung der mentalen Repräsentation negativer Zahlen wird das Paradigma dahingehend verändert, dass zwei verschiedene Standardzahlen (5 und −5) vorgegeben werden und die Vergleichszahlen aus dem Bereich −9 bis 9 (ausgenommen −5, 0 und 5) stammen. Welche Vorhersagen ergeben sich unter Berücksichtigung des numerischen Distanzeffekts sowie des SNARC-Effekts für die zwei Zahlenbereiche, wenn man von der Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls ausgeht? Beim numerischen Vergleich positiver Zahlen mit der Standardzahl 5 sollte sich auf beiden Seiten der Standardzahl ein Einfluss der numerischen Differenz nachweisen lassen. Der numerische Distanzeffekt sollte ebenfalls für negative Zahlen beim Standard −5 auftreten. Für den Vergleich der Zahlen 1 bis 4 mit der Standardzahl 5 sollten sich umso schnellere Reaktionen mit der linken Hand ergeben, je numerisch kleiner die Vergleichszahl ist. Dagegen sollten Reaktionen mit der rechten Hand für die Vergleichszahlen 6 bis 9 beim Standard 5 umso schneller ausfallen, je numerisch größer die Zahl ist. Ähnliche Ergebnisse werden für die Standardzahl −5 erwartet: Je numerisch kleiner (größer) die negative Vergleichszahl ist, desto schneller erfolgt die Reaktion mit der linken (rechten) Antwortseite. Der Zusammenhang zwischen der Reaktionszeitdifferenz aus rechter und linker Hand (dRT) und der Vergleichszahl ergibt in Kombination mit dem numerischen Distanzeffekt ein Reaktionszeitmuster, das beispielhaft an den Reaktionszeitverläufen mit der linken und rechten Hand für den Standard 5 und kleinen positiven Zahlen (1–4) erläutert wird. In diesem Zahlenbereich müsste eine generelle Abnahme der Reaktionszeiten mit Zunahme der numerischen Differenz gleichzeitig mit schnelleren linksseitigen Reaktionen einhergehen. Um jedoch einen kontinuierlichen Zusammenhang zwischen der numerischen Größe und der dRT zu erhalten, müsste diese Abnahme für Reaktionen mit der linken Antwortseite stärker ausfallen als für Reaktionen mit der rechten Antwortseite.

Wie sehen die Vorhersagen für den numerischen Vergleich negativer Zahlen mit Standard 5 sowie positiver Zahlen mit Standard −5 aus? Mit den Ergebnissen von Lochmann (2005) könnte man vermuten, dass die numerischen Urteile für diese Vergleichszahl-Standard-Kombinationen auf kategoriale Urteile mittels Klassifikation anhand des Vorzeichens reduziert werden. Die Ergebnisse von Fischer und Rottmann (2005) belegen jedoch, dass es für solche kategorialen Urteile einen Einfluss der numerischen Differenz sowie der Antworthand zumindest für positive Zahlen gibt. Deshalb wird davon ausgegangen, dass beide Effekte auch beim numerischen Vergleich negativer Zahlen mit dem Standard 5 sowie positiver Zahlen mit dem Standard −5 auftreten. Die Betrachtung der bisher vorhergesagten Reaktionszeitverläufe über den gesamten Zahlenbereich ermöglicht die Überprüfung des von Dehaene et al. (1993) gefundenen Einflusses des Zahlenintervalls. Auf die Zahlen 4 und 5 wurden kürzere Reaktionszeiten mit der linken bzw. rechten Hand produziert, je nachdem ob diese zusammen mit den Zahlen 0–3 oder 6–9 präsentiert wurden. In Anlehnung an dieses Ergebnis werden für negative Zahlen > −5 schnellere Reaktionen mit der rechten Antwortseite beim numerischen Vergleich mit dem Standard −5 vorhergesagt, während auf die gleichen Zahlen beim numerischen Vergleich mit dem Standard 5 schneller mit der linken Antwortseite reagiert werden sollte. Entsprechende Vorhersagen können für die positiven Zahlen 1–4 formuliert werden. Lautet der Standard −5 müsste darauf schneller mit der rechten Antwortseite geantwortet werden. Beim Standard 5 hingegen sollten sich für diese Zahlen kürzere Reaktionszeiten mit der linken Antwortseite zeigen lassen.

Im Gegensatz zu dem bis hierher recht kompliziert anmutenden Muster der Reaktionszeiten negativer und positiver Zahlen bei Existenz eines negativen Zahlenstrahls gestaltet sich die Vorhersage bzgl. der Strategie der Reaktionsumkehr einfacher. Zwischen positiven Zahlen und den Absolutbeträgen der negativen Zahlen werden mit Ausnahme erhöhter Reaktionszeiten auf negative Zahlen keine unterschiedlichen Ergebnisse erwartet. So aktiviert beispielsweise die Präsentation der Standardzahl −5 zusammen mit einer negativen Zahl (z. B. −9) die mentalen Repräsentationen dieser Zahlen auf dem (positiven) mentalen Zahlenstrahl. Reaktionsumkehr kann hier aufgefasst werden als Umwandlung der Antwort des anfänglichen Vergleiches $|-5| < |-9|$ in die korrekte Antwort. Die Vorhersagen bei Anwendung der Strategie der Instruktionsumkehr erweisen sich ebenso als einfach. Die Versuchsperson wird beispielsweise instruiert, die linke Taste zu drücken, wenn die Vergleichszahl numerisch kleiner als der Standard ist. Diese Instruktion kann in „Drücke die linke Taste, wenn der Absolutbetrag der Vergleichszahl größer als die Standardzahl ist.“ umgewandelt werden. Da mit beiden Strategieannahmen auf die mentale Repräsentation der positiven Zahlen zugegriffen wird, müsste sich ein SNARC-Effekt ergeben, der von der absoluten numerischen Größe der negativen Zahl abhängig ist: Je numerisch kleiner (größer) die negative Zahl ist, desto kürzer sind Reaktionen, die mit der rechten (linken) Hand erfolgen.

Die Vorhersagen der beiden Modelle lassen sich wie folgt zusammenfassen. Bei Gültigkeit der Zahlenstrahlannahme sollte sich für die jeweilige Standardzahl ein Reaktionszeitvorteil für Antworten mit der linken Hand auf Vergleichszahlen kleiner dem Standard und ein Reaktionszeitvorteil für Antworten mit der rechten Hand auf Vergleichszahlen größer dem Standard zeigen lassen. Gilt hingegen eine der beiden Strategieannahmen, so müsste der SNARC-Effekt vom Absolutbetrag der Vergleichszahlen abhängig sein. Für den numerischen Distanzeffekt ergeben sich bzgl. der beiden Annahmen identische Vorhersagen.

4.1.2 Methode

Versuchspersonen Für das erste Experiment konnten insgesamt 30 Versuchspersonen rekrutiert werden. Das mittlere Alter der 23 weiblichen und sieben männlichen Personen lag zwischen 21 und 34 Jahren ($M = 25$ Jahre, $SD = 3$ Jahre). Alle Versuchspersonen gaben an, Rechtshänder zu sein. Allerdings erwähnten zwei Versuchspersonen, in der Kindheit zum Schreiben mit der rechten Hand gezwungen worden zu sein. Die Teilnahme am Experiment wurde mit 12,- Euro bzw. zwei Versuchspersonenstunden vergütet.

Aufgabe In jedem Durchgang wurden nacheinander zwei Zahlen dargeboten und es sollte per Tastendruck entschieden werden, ob die zweite Zahl numerisch kleiner oder größer als die erste war.

Stimuli Die erste der beiden dargebotenen Zahlen (Standardzahl) konnte die Werte −5 oder 5 annehmen. Als zweite Zahl (Vergleichszahl) dienten alle 16 Zahlen von −9 bis 9 ohne die Zahlen −5, 0 und 5. Wäre jede Vergleichszahl gleich häufig präsentiert worden, so hätte sich pro Standard eine unterschiedliche Anzahl an links- und rechts-Reaktionen pro Sitzung ergeben. Beispielsweise sind beim Standard 5 von den 16 Vergleichszahlen vier numerisch größer, die verbleibenden 12 sind numerisch kleiner. Dadurch wäre beim Standard 5 die Auftretenswahrscheinlichkeit der kleiner-Antwort erhöht. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde die Präsentationshäufigkeit der Vergleichszahlen 6, 7, 8 und 9 beim Standard 5 sowie −9, −8, −7 und −6 beim Standard −5 verdreifacht. Alle Symbole wurden in schwarzer Schriftfarbe auf weißem Hintergrund dargestellt, positive Zahlen waren mit einem Pluszeichen versehen. Die Abfolge der Vergleichszahlen wurde so gewählt, dass die Absolutbeträge der Vergleichszahlen zweier aufeinander folgender Durchgänge stets verschieden voneinander waren. Des Weiteren wurde dieselbe Standardzahl nicht häufiger als dreimal nacheinander dargeboten.

Versuchsdurchführung Jede Versuchsperson absolvierte insgesamt zwei Sitzungen an zwei aufeinander folgenden Tagen. In einer Sitzung war die Versuchsperson aufgefordert, die linke Taste zu bedienen, wenn die Vergleichszahl numerisch kleiner als der Standard war. War die Vergleichszahl hingegen numerisch größer als der Standard, so sollte mit der rechten Taste reagiert werden. Diese Instruktion wird im Folgenden als kompatible Tastenzuordnung bezeichnet, da die Tastenzuordnung links-kleiner und rechts-größer der räumlichen Orientierung des mentalen Zahlenstrahls entspricht. Entsprechend gab es eine inkompatible Tastenzuordnung mit der Instruktion, bei einer numerisch kleineren zweiten Zahl die rechte und einer numerisch größeren zweiten Zahl die linke Taste zu bedienen. Insgesamt ergaben sich pro Instruktion 2 (Standard) × 24 (Zahlen) = 48 Bedingungen, die mit je 15 Replikationen auf zehn Blöcke à $3 + 72$ Durchgänge aufgeteilt wurden. In zwei aufeinander folgenden Blöcken wurde jede Vergleichszahl 3-mal bzw. 9-mal präsentiert. Die ersten drei Durchgänge in jedem Block dienten als *warm-up*.

Den Beginn eines Durchgangs kennzeichnete ein Rechteck mit einer Präsentationszeit von 400 ms. Nach weiteren 400 ms erschien der Standard für 500 ms. Dem folgte nach einem *inter-stimulus-interval* (ISI) von 400 ms die Präsentation der Vergleichszahl, die bis zum Tastendruck seitens der Versuchsperson auf dem Bildschirm sichtbar war. Das sich anschließende *inter-trial-interval* (ITI) lag im Bereich 1000–1500 ms. Zwischen den Blöcken gab es eine Pause von mindestens 30 s. Die Bildschirmwechsel wurden – in allen Experimenten – mit dem *vertical retrace* synchronisiert. Bei einem Sichtabstand von ca. 65 cm hatte das Rechteck ein Größe von etwa 2.5 (horizontal) × 2.0 cm (vertikal), was einem Sehwinkel von 2.2° × 1.8° entspricht. Die Zahlen wurden in der Größe 1.7 × 1.6 cm bzw. in einem Sehwinkel von 1.5° × 1.4° dargestellt. Die Versuchspersonen waren aufgefordert, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu antworten.

Versuchsplan Die beiden möglichen Standardzahlen −5 und 5 stellten eine der unabhängigen Variablen dar. Die numerische Größe der Vergleichszahlen im Bereich $[-9, \ldots, -4, -6, \ldots, -1, 1, \ldots, 4, 6, \ldots, 9]$ sowie die Antwortseite (links vs. rechts) bildeten zwei weitere unabhängige Variablen. Auch die Reihenfolge der Instruktionen (kompatibel-zuerst vs. inkompatibel-zuerst) wurde als unabhängige Variable in den Versuchsplan aufgenommen. Es handelt sich also um einen 2 × 16 × 2 × 2-Versuchsplan. Bis auf die Instruktionsreihenfolge sind die genannten Variablen *within-subjects* Variablen.

Geräte Zur Reizdarbietung und Reaktionszeiterfassung wurde ein handelsüblicher PC (Pentium II 330 MHz, Sony 17"Bildschirm, 100 Hz Bildwiederholfrequenz) verwendet. An diesen war ein Reaktionstaster zur Reaktionszeiterfassung angeschlossen. Das Experimentalsteuerprogramm wurde mit Hilfe des Watcom C/C++ Compilers in der Ausführungsumgebung DOS von der Autorin selbst programmiert.

4.1.3 Ergebnisse

4.1.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

Jede Versuchsperson absolvierte insgesamt zwei Sitzungen à zehn Blöcke, von denen jeweils die ersten beiden Blöcke als Übungsblöcke definiert wurden. Sie finden in der nachfolgenden Auswertung keine Berücksichtigung. Ferner dienten in jedem Block die ersten drei Durchgänge als Übung und fließen nicht in die Auswertung ein. Die folgende Auswertung bezieht sich ausschließlich auf Durchgänge, in denen eine korrekte Antwort abgegeben wurde.

Pro Versuchsperson wurde für jede der 64 Kombinationen aus Antwortseite, Standard und Vergleichszahl ein *trimmed mean* (Rosenberger & Gasko, 1983) mit einer *trimmed-mean*-Rate von 20 % (Wilcox, 1996) berechnet. Das Vorgehen für die Berechnung der *trimmed means* ist dabei wie folgt: Zunächst ordnet man die $n = 12$ bzw. $n = 36$ Reaktionszeiten einer Bedingung der Größe nach. Dann entfernt man die $g = (0.2 \times n)$ größten und die $g = (0.2 \times n)$ kleinsten Reaktionszeiten und berechnet aus den verbleibenden das arithmetische Mittel. Der Wert g stellt hierbei die größte ganze Zahl kleiner oder gleich $0.2 \times n$ dar. Da der so erhaltene *trimmed mean* einen kleineren Standardfehler als das gewöhnliche arithmetische Mittel besitzt und unempfindlicher auf Ausreißer reagiert, ist er für robuste Schätzungen von Lokalisationsparametern besonders geeignet (Wilcox, 1997).

Tabelle 4.1 gibt die mittleren Reaktionszeiten und Standardabweichungen, den Range und die relativen Fehlerhäufigkeiten pro Versuchsperson wieder. Damit soll verdeutlicht werden, dass es drei Versuchspersonen (6, 11 und 30) gibt, deren Datenmuster sich deutlich von dem der restlichen Versuchspersonen unterscheidet. Die mittleren Reaktionszeiten und Standardabweichungen sind teilweise doppelt so groß. Der Range der Reaktionszeiten nimmt Werte > 700 ms an, d. h. die mitt-

Tabelle 4.1

Mittlere Reaktionszeiten und deren Standardabweichungen (in ms), der Range der Reaktionszeiten (in ms) sowie die relativen Fehlerhäufigkeiten (rel. F.) pro Versuchsperson

Vp	*M*	*SD*	*Range*	rel. F.	Vp	*M*	*SD*	*Range*	rel. F.
1	486	67	268	.10	16	414	62	246	.06
2	526	61	265	.02	17	536	75	330	.02
3	480	68	265	.09	18	474	47	222	.06
4	592	107	456	.01	19	391	67	246	.09
5	650	63	226	.04	20	652	75	269	.05
6	1214	192	709	.01	21	480	69	283	.09
7	490	72	278	.09	22	580	77	333	.04
8	534	90	411	.02	23	490	79	332	.08
9	484	64	247	.04	24	447	59	238	.09
10	571	80	340	.05	25	466	71	257	.09
11	966	179	756	.10	26	571	102	401	.06
12	403	47	222	.06	27	642	72	272	.03
13	486	45	187	.17	28	576	73	275	.05
14	886	139	597	.01	29	814	130	487	.02
15	504	82	351	.02	30	1142	250	829	.02

leren Reaktionszeiten entstammen im Vergleich zu den restlichen Versuchspersonen einem deutlich größeren Intervall. Deshalb wurden die Versuchspersonen 6, 11 und 30 von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Leider konnte Versuchsperson 13 auch nicht in die Datenauswertung aufgenommen werden, da sie mehr als 10 % fehlerhafte Durchgänge produzierte. Insgesamt betrachtet, waren die Fehlerraten sehr gering. Gemittelt über beide Sitzungen ergab sich, ohne Berücksichtigung der Versuchspersonen 6, 11, 13 und 30, für numerische Vergleiche mit Standard 5 eine relative Fehlerhäufigkeit von .039 und für numerische Vergleiche mit Standard −5 von .071. Für die Überprüfung des Vorliegens eines *speed-accuracy tradeoff* wurde die Korrelation der mittleren Reaktionszeiten und relativen Fehlerhäufigkeiten pro Standard berechnet. Die Korrelation betrug für den Standard −5 $r = .969$ ($p < .0005$) und für den Standard 5 $r = .778$ ($p < .0005$). In diesem und in allen folgenden Experimenten wird das Signifikanzniveau auf 5 % festgesetzt.

4.1.3.2 Numerischer Vergleich zum Standard 5

Abbildung 4.1 gibt die mittleren Reaktionszeiten aller präsentierten Zahlen jeweils für Antworten mit der linken und rechten Antwortseite für den Standard 5 wieder. Der Abbildung kann entnommen werden, dass die Reaktionen auf große positive Zahlen (6 bis 9) mit 450 ms deutlich schneller erfolgen als auf kleine positive Zahlen (1 bis 4) mit 579 ms. Hingegen wird auf kleine negative Zahlen (−9 bis −6) mit 530 ms nur geringfügig langsamer reagiert als auf große negative Zahlen (−4 bis −1) mit 521 ms. Aus Abbildung 4.1 geht deutlich hervor, dass es keinen Einfluss der numerischen Differenz zu geben scheint.

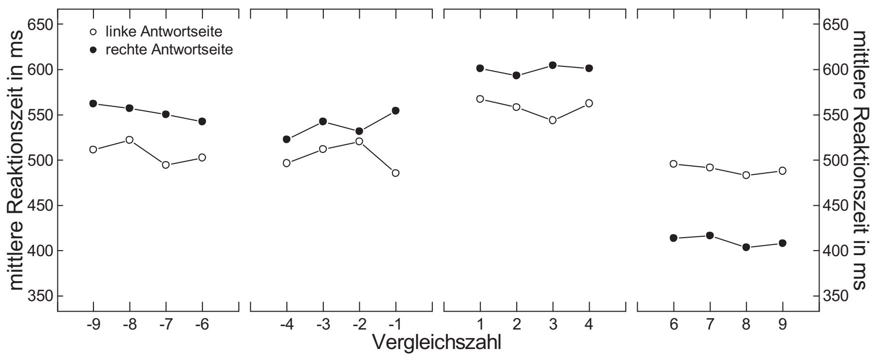


Abbildung 4.1. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und der rechten Hand in Abhängigkeit von der Vergleichszahl für die Bedingung Standard 5.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für den positiven und negativen Zahlenbereich getrennt dargestellt. Wie eingangs beschrieben, wurde die Reihenfolge der Instruktionen zwischen den Versuchspersonen variiert. Da diese Variable den SNARC-Effekt in nicht unerheblichem Maße beeinflusste, wurde der Faktor Instruktionsreihenfolge in die Analysen aufgenommen.

Für den positiven Zahlenbereich $[1,\ldots,4,6,\ldots,9]$ wurde eine vierfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Instruktionsreihenfolge (kompatibel-zuerst vs. inkompatibel-zuerst), Antwortseite (links vs. rechts), numerisches Intervall (< 5 vs. > 5) und numerische Distanz ($d = 1$ bis $d = 4$)

gerechnet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse dieser vierfaktoriellen Varianzanalyse in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2

Kennwerte der vierfaktoriellen Varianzanalyse der Bedingung Standard 5 für die positiven Vergleichszahlen

Effekt	df^*	F	p
Instruktionsreihenfolge (R)	1,24	0.071	.793
Antwortseite (A)	1,24	6.489	.018
numerisches Intervall (I)	1,24	74.036	<.0005
numerische Differenz (D)	3,72	0.646	.561(*GG*)
A×R	1,24	2.027	.167
I×R	1,24	0.027	.871
D×R	3,72	1.095	.351(*GG*)
A×I	1,24	18.013	<.0005
A×D	3,72	1.069	.359(*GG*)
I×D	3,72	0.748	.527
A×I×R	1,24	5.363	.029
A×D×R	3,72	1.131	.337(*GG*)
I×D×R	3,72	1.241	.301
A×I×D	3,72	0.631	.597
A×I×D×R	3,72	1.186	.321

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

Der signifikante Haupteffekt Antwortseite gibt an, dass mit der rechten Hand (505 ms) im Vergleich zur linken Hand (524 ms) schneller reagiert werden. Weiterhin wird der Reaktionszeitvorteil numerisch großer gegenüber numerisch kleinen positiven Zahlen anhand des signifikanten Faktors numerisches Intervall inferenzstatistisch abgesichert. Das Ausbleiben eines signifikanten Haupteffekts numerische Differenz bestätigt den Eindruck aus Abbildung 4.1. Die mittleren Reaktionszeiten für die numerischen Differenzen $d = 1$, $d = 2$, $d = 3$ und $d = 4$ lauten 518 ms, 514 ms, 509 ms und 516 ms; im positiven Zahlenbereich liegt kein numerischer Distanzeffekt vor. Bedeutsam für die Fragestellung ist der SNARC-Effekt, welcher sich in einer signifikanten Interaktion zwischen den Variablen Antwortseite und numerisches Intervall niederschlägt. Auf Zahlen < 5 kann im Mittel 42 ms schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand reagiert werden. Für Zahlen > 5 beträgt der Vorteil mit der rechten Hand im Mittel 79 ms. Diese inhaltlich bedeutsame Interaktion wird jedoch durch den Faktor Instruktionsreihenfolge moduliert, was in Tabelle 4.3 zusammenfassend dargestellt ist. Die beiden rechten Spalten dieser Tabelle geben die mittleren Reaktionszeiten und dRT-Werte für die Versuchspersonengruppe wieder, die in der ersten Sitzung die inkompatible Tastenzuordnung erhielt. Mit schnelleren links-Reaktionen und demzufolge positiven dRT-Werten auf Vergleichszahlen < 5 und schnelleren rechts-Reaktionen und sich daraus ergebenden negativen dRT-Werten auf Vergleichszahlen > 5 entspricht das Datenmuster der gewöhnlichen räumlich-numerischen Assoziation. Die Daten der Versuchspersonengruppe, die in der ersten Sitzung die kompatible Tastenzuordnung bekam, geben die beiden linken Spalten von Tabelle 4.3 wieder. Während auch hier die Antworten auf Zahlen > 5 schneller mit der rechten Antwortseite abgegeben wurden, kann für Vergleichszahlen < 5 mit $dRT = -2$ ms nicht von einem deutlichen Reaktionszeitvorteil die Rede sein. Der Effekt der Instruktionsreihenfolge über

Tabelle 4.3

Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und rechten Hand und die sich daraus ergebende Differenz (dRT) in der Bedingung Standard 5 für die beiden Instruktionsreihenfolgen, getrennt für die numerischen Intervalle <5 und >5 (alle Angaben in ms)

	Instruktionsreihenfolge			
	kompatibel-zuerst		inkompatibel-zuerst	
	Antwortseite		Antwortseite	
	links	rechts	links	rechts
Zahlen < 5	573	571	543	629
	dRT = −2		dRT = 86	
Zahlen > 5	474	417	506	404
	dRT = −57		dRT = −102	

den kompletten Zahlenbereich wird in Abbildung 4.2 weiter unten anschaulich dargestellt.

Für die Überprüfung des numerischen Distanzeffekts sowie des SNARC-Effekts innerhalb der negativen Vergleichszahlen wurde in gleicher Weise auf eine Varianzanalyse zurückgegriffen. Bei Betrachtung der über beide Instruktionsreihenfolgen gemittelten Reaktionszeiten (vgl. Abbildung 4.1) könnte man vermuten, dass der SNARC-Effekt auch im negativen Zahlenbereich aufzutreten scheint. Abbildung 4.2 verdeutlicht, dass die Instruktionsreihenfolge auch hier berücksichtigt werden muss.

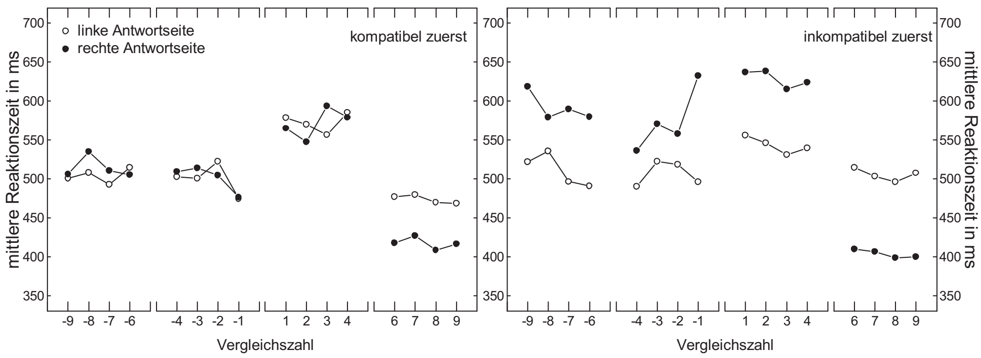


Abbildung 4.2. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und rechten Antwortseite in Abhängigkeit von der Vergleichszahl in der Bedingung Standard 5 getrennt für die zwei Kombinationen der Instruktionsreihenfolge. Links: kompatible Instruktion zuerst, rechts: inkompatible Instruktion zuerst.

In die sich so ergebende dreifaktorielle Varianzanalyse gingen die Faktoren Instruktionsreihenfolge (kompatibel-zuerst vs. inkompatibel-zuerst), Antwortseite (links vs. rechts) und Vergleichszahl $(-9,\ldots,-6,-4,\ldots,-1)$ ein. Der Haupteffekt Instruktionsreihenfolge wird mit $F_{1,24} = 0.564$ nicht signifikant. Das Vorhandensein des Einflusses der numerischen Differenz kann durch den nichtsignifikanten Haupteffekt Vergleichszahl nicht bestätigt werden ($F_{7,168} = 1.339$, $p = .271$ nach GG). Bedeutsamer ist jedoch das Ergebnis zum Haupteffekt Antwortseite, welcher entgegen der Annahme zur räumlich-numerischen Assoziation mit $F_{1,24} = 2.81$ und $p = .107$ das Signifikanzniveau verfehlt. Für Antworten mit der linken Hand erhält man im Mittel 506 ms, für Antworten mit der rechten Hand 545 ms. Obwohl es also eine Reaktionszeitdifferenz von 39 ms gibt, ist diese statistisch nicht signifikant. Die Interaktion Vergleichszahl × Antwortseite wird mit $F_{7,168} = 1.513$ und $p = .204$ (nach GG) nicht signifikant. Der Einfluss der Instruktionsreihenfolge äußert sich rein deskriptiv dahingehend, dass es in der Versuchspersonengruppe mit der Instruktionsreihenfolge kompatibel-zuerst einen vernachlässigbaren Reaktionszeitunterschied zwischen der rechten und linken Antwortseite von 6 ms gibt. Demgegenüber kann in der Bedingung inkompatibel-zuerst 74 ms schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand reagiert werden (siehe Abb. 4.2). Trotz dieser deutlichen Unterschiede wird die Interaktion Instruktionsreihenfolge × Antwortseite nicht signifikant ($F_{1,24} = 2.069$, $p = .163$). Ein Blick in die individuellen dRT-Daten macht deutlich, dass es zwischen den Versuchspersonen eine starke Streuung gibt. In der Instruktionsbedingung kompatibel-zuerst reagieren entgegen der räumlich-numerischen Assoziation fünf von 13 Versuchspersonen auf negative Zahlen schneller mit rechten Hand. Aber auch in der Bedingung inkompatibel-zuerst weisen drei der 13 Versuchspersonen einen deutlichen Vorteil bei Antworten mit der rechten Hand auf. Weiterhin sind weder die Interaktionen Vergleichszahl × Instruktionsreihenfolge ($F_{7,168} = 2.454$, $p = .080$ nach GG) noch die Dreifachinteraktion ($F_{7,168} = 1.728$, $p = .15$ nach GG) signifikant.

Zur graphischen Darstellung des SNARC-Effekts wird meist auf eine Darstellung zurückgegriffen, in der die Reaktionszeitdifferenz aus rechter und linker Hand (dRT) gegen die Vergleichszahlen abgetragen wird. Wenngleich in der Literatur i. d. R. ein kontinuierlicher Zusammenhang berichtet wird, geht aus Abbildung 4.3 deutlich ein kategorialer Zusammenhang hervor: Auf alle Zahlen, die numerisch kleiner als die Standardzahl 5 sind, kann schneller mit der linken Hand reagiert werden, wobei es zwischen den einzelnen numerischen Größen keine weitere Differenzierung gibt. Gleichermaßen können Urteile auf die Zahlen 6–9 schneller mit der rechten Antwortseite abgegeben werden; die dRT-Werte dieser vier Vergleichszahlen schwanken geringfügig um den Wert −80 ms.

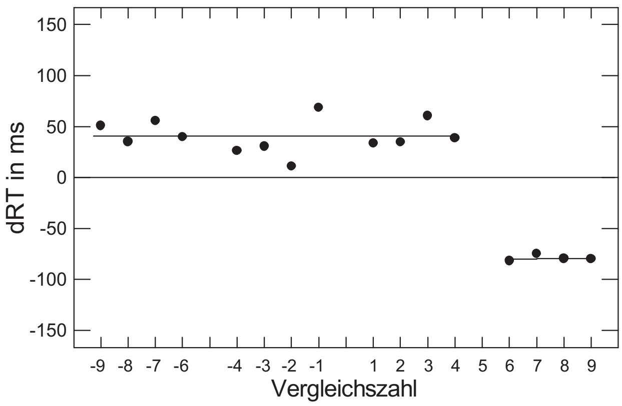


Abbildung 4.3. Der kategoriale SNARC-Effekt für den Standard 5. An der y-Achse wurden die Differenzen der Reaktionszeiten (dRT) abgetragen, die mit der rechten und linken Antwortseite entstehen. Ein negativer dRT-Wert resultiert aus der schnelleren Reaktion mit der rechten im Vergleich zur linken Antwortseite. Ein positiver dRT-Wert kommt durch die schnellere Reaktion mit der linken im Vergleich zur rechten Antwortseite zustande. Die beiden Geraden stellen die Lösung des diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regressionsmodells dar (Erläuterungen im Text).

Aufgrund dieses Datenmusters wurde für die Überprüfung des SNARC-Effekts eine diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression (vgl. Neter, Wasserman & Kutner, 1990) an die Daten angepasst:

$$Y = b_0 + b_1 X + b_2 (X - bp)(X > bp) + b_3 (X > bp). \tag{4.1}$$

Die Parameter b_0 bis b_3 sind die zu schätzenden Regressionskoeffizienten, X steht für den Prädiktor. Mit bp wird der Unterbrechungspunkt bezeichnet, d. h. der Punkt an dem sich der Zusammenhang zwischen X und Y verändert. Der Ausdruck $(X > bp)$ kann die Werte 0 oder 1 annehmen, wobei bei Erfüllung der Ungleichung der Wert 1, bei Nicht-Erfüllung der Wert 0 lautet. Abbildung 4.4 veranschaulicht die Bedeutung der einzelnen Parameter.

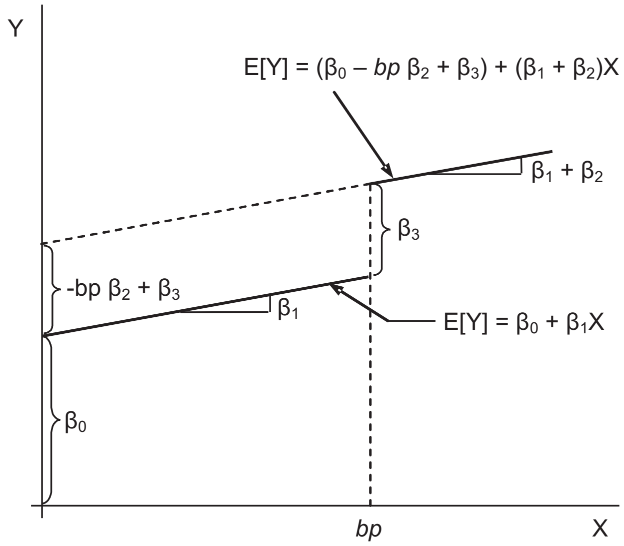


Abbildung 4.4. Bedeutung der Parameter b_0 bis b_3 des diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regressionsmodells, Abbildung in Anlehnung an Neter et al. (1990).

Wählt man nun die Reaktionszeitdifferenz dRT als Kriterium, die numerische Größe Z als Prädiktor und $bp = 5$ als Unterbrechungspunkt, so lautet die Regressionsgleichung

$$dRT = b_0 + b_1 Z + b_2 (Z - 5)(Z > 5) + b_3 (Z > 5). \tag{4.2}$$

Die Lösungen für die einzelnen Parameter – auf ganze Zahlen gerundet – und die entsprechenden Konfidenzintervalle (in eckigen Klammern angegeben) lauten: $b_0 = 41\ [29, 52]$, $b_1 = 0\ [-2, 2]$, $b_2 = 0\ [-15, 15]$ und $b_3 = -120\ [-166, -74]$. Diese Regressionslösung liefert einen multiplen Korrelationskoeffizienten von $R^2 = .938$. In der Literatur werden die Daten jedoch fast ausschließlich mittels linearer Regressionen beschrieben. Deshalb wurde das Modell aus Gleichung 4.2 gegen ein lineares Modell getestet, das identische Steigungen der beiden Regressionsabschnitte ($b_2 = 0$) sowie einen nicht von Null verschiedenen Abstand zwischen den beiden Geradensegmenten am Unterbrechungspunkt bp ($b_3 = 0$) annimmt. Das Ergebnis mit $F_{2,12} = 38.18$ und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < .0005$ besagt, dass das vollständige Modell angemessener ist. Schon die mit 0 geschätzten Regressionskoeffizienten b_1 und b_2 implizieren, dass die beiden Steigungskoeffizienten b_1 und b_2 nicht zusätzlich zur Varianzaufklärung beitragen. Dies wird durch einen nicht signifikanten Modelltest ($F_{2,12} = 0.0003$) bestätigt. Bemerkenswert ist die Güte der Anpassung des eingeschränkten Modells mit $R^2 = .938$, die mit der Güte der Anpassung des vollständigen Modells übereinstimmt.

Die Ergebnisse der Modelltests mit nicht von Null verschiedenen Anstiegen b_1 und $b_1 + b_2$ führen zu den auf die Achsenabschnitte reduzierten Regressionsgleichungen (Werte in ms):

$$dRT = \begin{cases} 41 & \text{für } Z < 5 \\ -80 & \text{für } Z > 5. \end{cases} \tag{4.3}$$

Anstelle der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression hätte man sich auch an die in der Literatur vorherrschende Auswertung mittels linearer Regression der Form

$$dRT = b_0 + b_1 Z \tag{4.4}$$

halten können. Mit dem Prädiktor Vergleichszahlen (Z) wäre man zu dem Ergebnis $dRT = 11 - 7Z$ bei einer Varianzaufklärung von 29 % gelangt. Entsprechend der Methode von Lorch und Myers (1990) wurde die lineare Regression pro Versuchsperson gerechnet und die so erhaltenen Koeffizienten mittels Ein-Stichproben-t-Tests gegen Null abgesichert. Auf diese Weise erhält man einen signifikanten Anstieg ($t_{25} = -3.017$, $p = .003$) und einen nicht signifikanten Achsenabschnitt ($t_{25} = 0.786$, $p = .44$). Aus dem negativen Wert des Anstiegs hätte man fälschlicherweise einen kontinuierlichen Zusammenhang zwischen der dRT und den numerischen Größen geschlussfolgert und damit das Standardergebnis zum SNARC-Effekt repliziert. Demgegenüber erzielt man mit den Ergebnissen der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression nicht nur einen Zuwachs der Varianzaufklärung von 65 %, sondern zusätzlich eine Änderung des Zusammenhangs zwischen den dRT-Werten und der numerischen Größe: Für den Standard 5 liegt der SNARC-Effekt in einer kategorialen Form vor.

Da die bisher durchgeführten Modelltests mit den Koeffizienten der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression auf über Versuchspersonen gemittelten Werten basieren, findet auch hier die Vorgehensweise von Lorch und Myers (1990) Anwendung. Die Ergebnisse gibt Tabelle 4.4 wieder.

Tabelle 4.4

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten der Bedingung Standard 5

Koeffizient	Wert	95%-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	41	[−1,81]	2.055	.05
b_1	0^a	[−3,3]	0^a	
b_2	0^a	[−5,5]	0.074	.942
b_3	−120	[−179,−60]	−4.155	<.0005

Anmerkung. * $df = 25$, a: auf drei Kommastellen gerundet.

Die Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests bestätigen nochmals die Ergebnisse der vorangegangenen Modelltests. Die beiden Regressionsanstiege unterscheiden sich nicht signifikant von Null, wohingegen der Achsenabschnitt b_0 und der Abstand zwischen den beiden Geradensegmenten b_3

signifikant von Null abweichen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass der SNARC-Effekt für den Standard 5 eine kategoriale Form aufweist.

Eine für die beiden Instruktionsreihenfolgen getrennte Betrachtung schränkt diese Schlussfolgerung leider ein. Für die Bedingung inkompatibel-zuerst stimmen die Ergebnisse der Ein-Stichproben-*t*-Tests gut mit denen aus Tabelle 4.4 überein. Für die Bedingung kompatibel-zuerst ergibt sich ein ernüchterndes Bild (siehe Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten der Bedingung Standard 5 für die Instruktionsreihenfolge kompatibel-zuerst

Koeffizient	Wert	95%-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	1	$[-61, 62]$	0.019	.985
b_1	−1	$[-7, 5]$	−0.408	.694
b_2	2	$[-4, 8]$	0.908	.382
b_3	−54	$[-150, 41]$	−1.238	.239

Anmerkung. * $df = 12$.

Keiner der vier Koeffizienten aus Tabelle 4.5 wird signifikant. Selbst der Koeffizient b_3 verfehlt trotz eines Wertes von −54 ganz klar das Signifikanzniveau. Ein Blick auf die 95 %-Konfidenzintervalle liefert den Grund dafür: Die Versuchspersonen weisen eine zu große Streuung, insbesondere bei den beiden Parametern b_0 und b_3, auf. Alle 13 Versuchspersonen in dieser Instruktionsbedingung produzieren – numerisch gesehen – von Null verschiedene dRT. Allerdings zeigen fünf der 13 Versuchspersonen einen umgekehrten Zusammenhang zwischen Antwortseite und numerischem Intervall, da sie in der inkompatiblen Bedingung kürzere Reaktionszeiten produzieren. Damit ergeben sich für Zahlen < 5 kürzere Reaktionszeiten bei Reaktion mit der rechten im Vergleich zur linken Hand und für Zahlen > 5 kürzere Reaktionszeiten bei Reaktion mit der linken im Vergleich zur rechten Hand. Gemittelt über alle Versuchspersonen resultieren deshalb nicht von Null signifikant verschiedene Koeffizienten.

4.1.3.3 Numerischer Vergleich zum Standard −5

Bei der nachfolgenden statistischen Auswertung entspricht das generelle Vorgehen weitgehend dem der Bedingung Standard 5. Abbildung 4.5 soll zunächst für einen Überblick zum Datenmuster des numerischen Vergleiches mit Standard −5 hilfreich sein. Die Reaktionen auf numerisch kleine negative Zahlen erfolgen mit 544 ms schneller als auf numerisch große negative Zahlen mit 669 ms. Allerdings ergeben sich für numerisch kleine und große positive Zahlen die kürzesten Reaktionszeiten (529 ms bzw. 528 ms). In Übereinstimmung mit den Ergebnissen zum Standard 5 ist auch für den Standard −5 festzustellen, dass auf Vergleichszahlen kleiner dem Standard schneller mit der linken Hand und auf Vergleichszahlen größer dem Standard schneller mit der rechten Hand geantwortet werden kann.

Auch hier wurde zur Überprüfung des numerischen Distanzeffekts sowie des SNARC-Effekts im negativen Zahlenbereich eine vierfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den drei

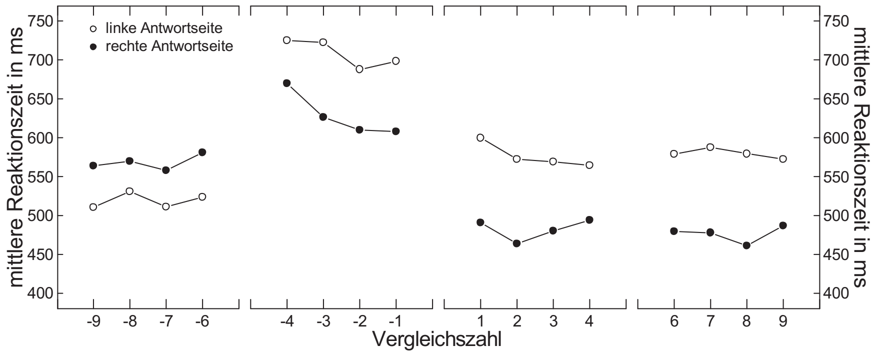


Abbildung 4.5. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und der rechten Hand in Abhängigkeit von der Vergleichszahl für die Bedingung Standard −5.

Faktoren Antwortseite (links vs. rechts), numerisches Intervall (< −5 vs. > −5) und numerische Differenz (d = 1 bis d = 4) sowie dem *between-subjects* Faktor Instruktionsreihenfolge (kompatibel-zuerst vs. inkompatibel-zuerst) gerechnet. Die Ergebnisse fasst Tabelle 4.6 zusammen.

Tabelle 4.6

Kennwerte der vierfaktoriellen Varianzanalyse der Bedingung Standard −5 für die negativen Vergleichszahlen

Effekt	df^*	F	p
Instruktionsreihenfolge (R)	1,24	0.333	.569
Antwortseite (A)	1,24	2.682	.115
numerisches Intervall (I)	1,24	128.903	<.0005
numerische Differenz (D)	3,72	6.362	.001
A×R	1,24	4.191	.052
I×R	1,24	1.473	.237
D×R	3,72	0.359	.783
A×I	1,24	9.021	.006
A×D	3,72	0.98	.407
I×D	3,72	2.937	.051 (*GG*)
A×I×R	1,24	9.126	.006
A×D×R	3,72	0.867	.462
I×D×R	3,72	0.964	.402 (*GG*)
A×I×D	3,72	0.739	.532
A×I×D×R	3,72	0.548	.651

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

Der leichte Reaktionszeitvorteil, der durch Antworten mit der rechten (614 ms) im Vergleich zur linken Hand (598 ms) zustande kommt, wird nicht signifikant. Allerdings wird dieses Ergebnis durch den Faktor Instruktionsreihenfolge beeinflusst. So zeigen Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung die kompatible Tastenzuordnung bearbeiteten nur einen geringfügigen Reaktionszeitunterschied zwischen Reaktionen mit der linken (591 ms) und rechten Antwortseite (595 ms). Demgegenüber erzielen Versuchspersonen, die das inkompatible *mapping* in der ersten Sitzung zugewiesen bekamen einen Reaktionszeitvorteil der rechten Antwortseite von 25 ms. Der Haupteffekt numerisches Intervall wird signifikant. Im Gegensatz zum Ausbleiben des numerischen Distanzeffekts beim Standard 5 überschreitet der Haupteffekt numerische Differenz eindeutig das Signifikanzniveau. Die mittleren Reaktionszeiten auf die numerischen Differenzen $d = 1$, $d = 2$, $d = 3$ und $d = 4$ lauten: 625 ms, 605 ms, 600 ms und 595 ms. Wie aus Abbildung 4.5 ersichtlich ist, beschränkt sich der Einfluss der numerischen Differenz auf negative Zahlen > −5. Daraus ergibt sich die signifikante Interaktion der Faktoren numerische Differenz und numerisches Intervall. Die für den SNARC-Effekt bedeutsame signifikante Interaktion zwischen der Antwortseite und dem numerischen Intervall wird – wie auch schon beim Standard 5 – von der Instruktionsreihenfolge beeinflusst. Die Gegenüberstellung der beiden Instruktionsreihenfolgen erläutert Tabelle 4.7.

Tabelle 4.7

Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und rechten Hand und die sich daraus ergebende Differenz (dRT) in der Bedingung Standard −5 für die beiden Instruktionsreihenfolgen, getrennt für die numerischen Intervalle < −5 und > −5 (alle Angaben in ms)

	Instruktionsreihenfolge			
	kompatibel-zuerst		inkompatibel-zuerst	
	Antwortseite		Antwortseite	
	links	rechts	links	rechts
Zahlen < −5	535	539	504	598
	dRT = 4		dRT = 94	
Zahlen > −5	646	650	771	607
	dRT = 4		dRT = −164	

Während Versuchspersonen in der Bedingung kompatibel-zuerst kaum Reaktionszeitunterschiede mit der linken und rechten Hand produzieren, stellt sich in der Bedingung inkompatibel-zuerst ein recht deutlicher SNARC-Effekt heraus: Auf Zahlen < −5 erfolgt die Reaktion schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand, auf Zahlen > −5 schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand.

Zur Überprüfung des SNARC-Effekts im positiven Zahlenbereich wurde eine dreifaktorielle Varianzanalyse herangezogen, in die die zwei Messwiederholungsfaktoren Antwortseite (links vs. rechts) und Vergleichszahl $(1,\ldots,4,6,\ldots,9)$ sowie die Instruktionsreihenfolge (kompatibel-zuerst vs. inkompatibel-zuerst) als *between-subjects* Faktor aufgenommen wurden. Abbildung 4.6 veranschaulicht das Zusammenwirken dieser drei Variablen. Weder der Haupteffekt Instruktionsreihenfolge ($F_{1,24} = 0.14$, $p = .771$) noch der Haupteffekt Vergleichszahl ($F_{7,168} = 1.269$, $p = .288$ nach GG) ist signifikant. Hingegen unterschreitet der Haupteffekt Antwortseite mit $F_{1,24} = 30.864$ und $p < .0005$ deutlich das Signifikanzniveau. Dies kann auf weitaus schnellere Reaktionen mit der rechten (479 ms) im Vergleich zur linken Hand (578 ms) zurückgeführt werden. Dieses Ergebnis wird nicht von der Instruktionsreihenfolge beeinflusst ($F_{1,24} = 0.746$, $p = .369$). Alle weiteren Zweifachinteraktionen sowie die Dreifachinteraktion verfehlen mit F-Werten kleiner als 1.5 das Signifikanzniveau.

Für die Standardzahl −5 soll zunächst das in der Literatur vielfach berichtete Auswertungsverfah-

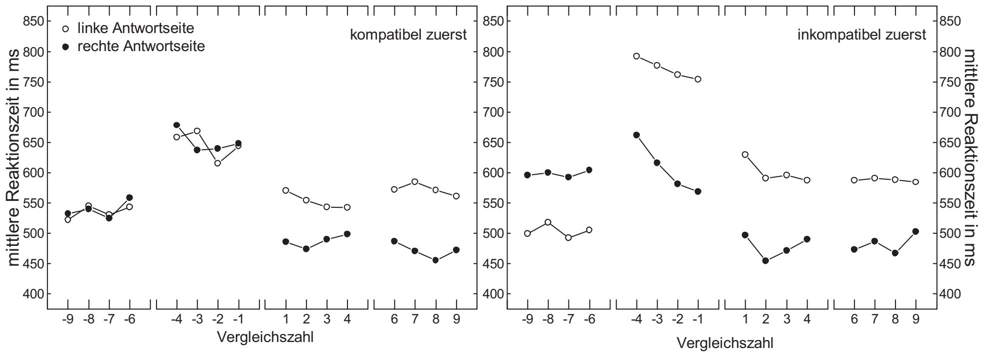


Abbildung 4.6. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und rechten Antwortseite in Abhängigkeit von den Vergleichszahlen in der Bedingung Standard −5 getrennt für die zwei Instruktionsreihenfolgen. Links: kompatible Instruktion zuerst, rechts: inkompatible Instruktion zuerst.

ren zum SNARC-Effekt in Form der linearen Regression mit den Vergleichszahlen Z als Prädiktor Anwendung finden. Die resultierende Regressionsgerade lautet: $dRT = -57 - 8Z$. Diese Regressionslösung liefert nach der Methode von Lorch und Myers (1990) sowohl einen signifikanten Achsenabschnitt ($t_{25} = -5.106$, $p < .0005$) als auch einen signifikanten Anstieg ($t_{25} = -4.669$, $p < .0005$) bei einem Determinationskoeffizienten von $R^2 = .628$. Mit einer Varianzaufklärung von knapp 63 % wäre die Schlussfolgerung eines kontinuierlichen Zusammenhangs durchaus angemessen. Die Ergebnisse der Varianzanalysen zum Standard −5 legen jedoch nahe, dass der SNARC-Effekt weitaus besser durch eine kategoriale Form beschrieben werden kann, weshalb erneut auf die diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression zurückgegriffen wird. Die Darstellung der Reaktionszeitdifferenzen aus rechter und linker Hand (dRT) in Abbildung 4.7 liefert eine Bestätigung für dieses Vorgehen.

Daher wurde eine diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression mit

$$dRT = b_0 + b_1 Z + b_2 (Z+5)(Z > -5) + b_3 (Z > -5). \quad (4.5)$$

an die Daten angepasst. Anhand des Prädiktors Vergleichszahl Z mit Werten im Bereich $[-9, \ldots, -6, -4, \ldots, -1, 1, \ldots, 4, 6, \ldots, 9]$ soll wiederum die dRT vorhergesagt werden. Der Standard −5 wurde als Unterbrechungspunkt bp eingesetzt. Die Lösungen für die einzelnen Parameter – auf ganze Zahlen gerundet – und die entsprechenden Konfidenzintervalle (in eckigen Klammern angegeben) lauten: $b_0 = 64\ [-54, 181]$, $b_1 = 2\ [-13, 17]$, $b_2 = -4\ [-20, 12]$ und $b_3 = -132\ [-178, -84]$. Die Regressionslösung liefert einen multiplen Korrelationskoeffizienten von $R^2 = .953$, der beinahe identisch dem multiplen Korrelationskoeffizienten ist, der mit Gleichung 4.2 zum Standard 5 berichtet wurde.

Der Determinationskoeffizient von $R^2 = .953$ deutet an, dass die Modelllösung die Daten sehr gut beschreibt. Dennoch besteht die Möglichkeit, dass eine lineare Gleichung mit $b_2 = 0$ und $b_3 = 0$ zu einer vergleichbaren Varianzaufklärung führt. Das Ergebnis dieses eingeschränkten Modells muss mit $F_{2,12} = 37.864$ und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < .0005$ klar zurückgewiesen werden. Das vollständige Modell mit allen vier Regressionskoeffizienten stellt die angemessenere Regressionslösung dar. Wie schon erwähnt wurde, weist der SNARC-Effekt auch beim Standard

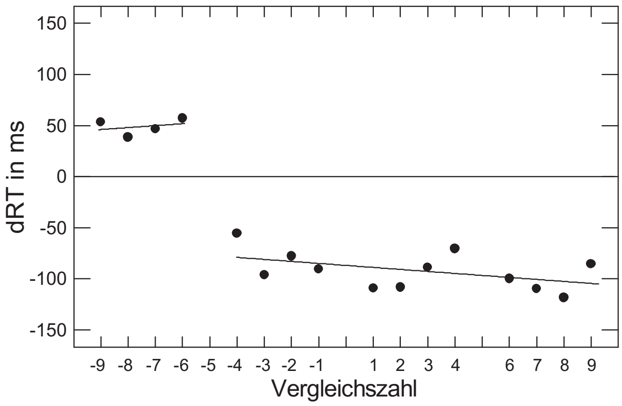


Abbildung 4.7. Der kategoriale SNARC-Effekt für den Standard −5. Die beiden Geraden stellen die Lösung der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression dar (Erläuterungen im Text).

−5 eher eine kategoriale Form auf (vgl. Abbildung 4.7). Setzt man die beiden Modellparameter b_1 und b_2 simultan auf Null, so ergibt sich eine Modelllösung, die die Annahme einer kategorialen SNARC-Form bestätigt. Der F-Wert von 1.694 ($p = .225$) spricht klar dafür, dass die Daten besser durch das eingeschränkte Modell mit den beiden Parametern b_0 und b_3 repräsentiert werden. Es wird erneut auf die Modellgüte von $R^2 = .939$ verwiesen, die nur geringfügig von der Modellgüte des vollständigen Modells ($R^2 = .953$) abweicht. Eine Beschränkung der Auswertung auf die anfangs berechnete lineare Regression hätte auch für den Standard −5 fälschlicherweise einen Beleg für die typische kontinuierliche Form des SNARC-Effekts zur Folge gehabt.

Die Ergebnisse der Modelltests mit nicht von Null verschiedenen Anstiegen führen zu den auf die Achsenabschnitte reduzierten Regressionsgeraden (in ms):

$$dRT = \begin{cases} 49 & \text{für } Z < -5 \\ -92 & \text{für } Z > -5. \end{cases} \tag{4.6}$$

Nach der Methode von Lorch und Myers (1990) wurden die Parameter pro Versuchsperson geschätzt und in anschließenden Ein-Stichproben-t-Tests gegen Null abgesichert. Tabelle 4.8 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 4.8

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten der Bedingung Standard −5

Koeffizient	Wert	95 %-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	64	$[-21, 148]$	1.557	.132
b_1	2	$[-8, 12]$	0.397	.695
b_2	−4	$[-14, 6]$	−0.787	.439
b_3	−132	$[-137, -37]$	−2.397	.024

Anmerkung. * $df = 25$.

Die Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests stimmen leider nicht vollständig mit den Ergebnissen der vorangegangenen Modelltests überein. Den Ergebnissen der Modelltests entsprechend unterscheiden sich die Koeffizienten der Anstiege nicht signifikant von Null, gleiches gilt allerdings auch für den Regressionskoeffizienten b_0. Dies würde bedeuten, dass der Achsenabschnitt des Geradensegments für Zahlen <−5 die y-Achse im Punkt Null schneidet. Nach Berechnung des Achsenabschnitts des zweiten Geradensegments erhält man über die Gleichung $c_0 = b_0 + 5b_2 + b_3$ einen Wert von −88. Ein entsprechender Ein-Stichproben-*t*-Test liefert das Ergebnis, dass sich dieser Wert signifikant von Null unterscheidet ($t_{25} = -3.625$, $p = .001$). Zusammen mit dem Ergebnis eines signifikanten Abstandes der beiden Geradensegmente am Unterbrechungspunkt kann die kategoriale Form des SNARC-Effekts demzufolge belegt werden.

Auch hier soll eine für die beiden Instruktionsreihenfolgen getrennte Darstellung nicht ausbleiben. Für die Versuchspersonengruppe, die in der ersten Sitzung das inkompatible *mapping* zugeteilt bekam, weichen die beiden Steigungskoeffizienten b_1 und b_2 nicht signifikant von Null ab ($b_1 = 2.523$, $t_{12} = 0.332$, $p = .745$; $b_2 = 2.99$, $t_{12} = 0.51$, $p = .619$). Der Abstand der beiden Geraden am Unterbrechungspunkt $b_3 = -272.781$ unterschiedet sich allerdings mit $t_{12} = -4.003$ ($p = .002$) signifikant von Null. Leider verfehlt der Achsenabschnitt der ersten Geraden b_0 trotz eines sehr großen Wertes von 113.346 mit $t_{12} = 1.969$ ($p = .072$) knapp das Signifikanzniveau. Da nur zwei Versuchspersonen einen negativen Parameter b_0 aufweisen (Vp 11: $b_0 = -352$, Vp 17: $b_0 = -32$), kann dieses Ergebnis eindeutig auf die Versuchsperson 11 zurückgeführt werden. Rechnet man einen Ein-Stichproben-*t*-Test ohne den Wert dieser Versuchsperson, so wird der Achsenabschnitt des ersten Geradensegments mit $b_0 = 152.083$ deutlich signifikant ($t_{11} = 3.286$, $p = .007$). Betrachtet man jedoch erneut den Achsenabschnitt des zweiten Geradensegments $c_0 = -144.487$ ($t_{12} = -4.89$, $p < .0005$), so bestätigt sich die kategoriale Form des SNARC-Effekts für diese Versuchspersonengruppe auch ohne Ausschluss einer Versuchsperson. Die Ergebnisse der Instruktionsbedingung kompatibel-zuerst sind in Tabelle 4.9 wiedergegeben.

Tabelle 4.9

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten der Bedingung Standard −5 für die Instruktionsreihenfolge kompatibel-zuerst

Koeffizient	Wert	95 %-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	14	$[-110, 138]$	0.247	.809
b_1	1	$[-13, 16]$	0.211	.837
b_2	−11	$[-28, 6]$	−1.381	.193
b_3	10	$[-137, 157]$	0.145	.887

Anmerkung. * $df = 12$.

In dieser Versuchspersonengruppe unterscheidet sich keiner der Koeffizienten statistisch signifikant von Null. Die Breite der Konfidenzintervalle gibt jedoch an, dass die Daten der Versuchspersonen stark streuen. Für den Koeffizienten b_0 beträgt die Standardabweichung 205.786, der Koeffizient b_3 hat eine Standardabweichung von 243.768. Wie schon beim Standard 5 kann auch hier argumentiert werden, dass es keine Versuchsperson gibt, deren dRT-Werte über den gesamten Zahlenbereich nahe Null liegen. Vielmehr zeigen sechs von 13 Versuchspersonen einen umgekehrten Zusammenhang, d. h. auf Zahlen < −5 kann schneller mit der rechten Hand und auf Zahlen > −5 schneller mit der linken Hand reagiert werden. Dies kann wiederum auf schnellere Reaktionen in der 2. Sitzung, in der das inkompatible *mapping* bearbeitet wurde, zurückgeführt werden.

4.1.4 Diskussion

Die wesentlichen Ergebnisse für den Standard 5 sind das Ausbleiben des numerischen Distanzeffekts sowie das Vorliegen eines kategorialen SNARC-Effekts. Allerdings konnte dieser kategoriale SNARC-Effekt nur für Versuchspersonen nachgewiesen werden, welche in der ersten Sitzung die inkompatible Instruktion erhielten. Diese produzierten signifikant kürzere Reaktionszeiten mit der linken Hand auf Zahlen < 5 und mit der rechten Hand auf Zahlen > 5. Für Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung das kompatible *mapping* bearbeiteten, konnte der SNARC-Effekt nicht abgesichert werden. Die Ursache dafür lag in dieser Bedingung in systematischen Unterschieden zwischen den Versuchspersonen. Zwar erzeugte ein Teil der Versuchspersonen das eben beschriebene Reaktionszeitmuster, einige Versuchspersonen reagierten jedoch deutlich schneller in der inkompatiblen Instruktionsbedingung und erzielten damit kürzere Reaktionen auf Zahlen < 5 mit der rechten und auf Zahlen > 5 mit der linken Hand. Beim numerischen Vergleich mit Standard -5 ließ sich ein numerischer Distanzeffekt nur für negative Zahlen > -5 nachweisen. Varianzanalytisch ergaben sich auf Zahlen < -5 schnellere Reaktionen mit der linken Hand und auf Zahlen > -5 schnellere Reaktionen mit der rechten Hand. Regressionsanalytisch wurde auch hier gefunden, dass ein kategorialer Zusammenhang zwischen der numerischen Größe und der Antwortseite die Daten besser widerspiegelt als ein linearer Zusammenhang. Einschränkend ergab sich jedoch für das erste Geradensegment, d. h. für Zahlen < -5 ein nicht von Null verschiedener Achsenabschnitt, was auch hier auf die Instruktionsreihenfolge zurückgeführt werden konnte.

In keinem der in der Literatur berichteten Experimente zum numerischen Vergleich mit einer Standardzahl wurde ein Einfluss der Instruktionsreihenfolge berichtet. Wie weiter oben beschrieben, gab es Versuchspersonen, die mit der inkompatiblen Tastenzuordnung kürzere Reaktionszeiten produzierten als mit der kompatiblen Tastenzuordnung. Dieser Effekt war besonders stark in der Versuchspersonengruppe ausgeprägt, die in der ersten Sitzung das kompatible *mapping* erhielten. Es besteht die Möglichkeit, dass der Effekt der Instruktionsreihenfolge durch die sitzungsweise Variation der Instruktion zustande kam. In allen bisher berichteten Experimenten zum numerischen Vergleich mit einer Standardzahl wurde die Tastenzuordnung wegen der geringen Anzahl der Vergleichszahlen innerhalb einer Sitzung nach der Hälfte der Durchgänge vertauscht. Möglicherweise wirkt sich der Instruktionswechsel innerhalb einer Sitzung nachteiliger auf die inkompatible Tastenzuordnung aus. Die Versuchspersonen in diesem Experiment absolvierten zu jeder Tastenzuordnung eine komplette Sitzung, was dazu geführt haben könnte, dass der Übungseffekt der zuerst ausgeführten Instruktion nachließ. Zusätzlich könnte sich die zu Beginn der zweiten Sitzung schon bestandene Vertrautheit mit dem Experiment vorteilhaft auf die Reaktionszeiten ausgewirkt haben. Alternativ könnte man auch annehmen, dass der SNARC-Effekt mit genügend Übung verschwindet. Leider existieren dazu noch keine Untersuchungen.

Insbesondere das Ausbleiben des numerischen Distanzeffekts beim Vergleich positiver Zahlen zur Standardzahl 5 deckt sich keineswegs mit den Ergebnissen von Bull et al. (2005), Gevers, Verguts et al. (2006), Ito und Hatta (2004) und Nuerk et al. (2005), die diesen sowohl für Zahlen kleiner als auch für Zahlen größer als der Standard 5 berichten. Der fehlende Einfluss der numerischen

Differenz könnte auf die Verwendung von zwei Standardzahlen zurückgeführt werden. Schneider und Logan (2007) liefern einen Beleg gegen diesen Ansatz. Die Autoren wählten die beiden Zahlen 2 und 7 als Standardzahlen und die Zahlen 0, 1, 3, 4, 5, 6, 8 und 9 als Vergleichszahlen. Die Standardzahlen wurden als geometrische Figuren (Kreis und Dreieck) präsentiert. Der Einfluss der numerischen Differenz ergab sich mit beiden Standardzahlen. Beispielsweise konnte beim Standard 7, für den es nur zwei numerisch größere Zahlen (8 und 9) gab, auf die Zahl 9 ($d = 2$) schneller reagiert werden als auf die Zahl 8 ($d = 1$).

Eine zweite Möglichkeit für die Erklärung des fehlenden Einflusses der numerischen Differenz besteht in der Erhöhung der Präsentationshäufigkeit der Zahlen 6 bis 9 beim Standard 5 und der Zahlen −9 bis −6 beim Standard −5, auf die besonders schnell reagiert wurde. Nach Logan (1988) kann auf Stimuli, die stets die gleiche Reaktion verlangen (dies trifft auf die häufiger präsentierten Zahlen zu), schneller reagiert werden als auf Stimuli, die abhängig von der Standardzahl eine unterschiedliche Reaktion verlangen (Zahlen 1 bis 4 sowie −1 bis −4). Er spricht in diesem Zusammenhang von einem *mapping effect*. Die unterschiedliche Präsentationshäufigkeit kann dazu geführt haben, dass die Vergleichszahlen nur noch mit dem am häufigsten präsentierten Zahlenintervall des jeweiligen Standards verglichen wurden. So wurde möglicherweise beim Standard 5 nur noch entschieden, ob die präsentierte Zahl aus dem Intervall 6 bis 9 stammte. Zur Überprüfung dieser Hypothese wird deshalb ein Kontrollexperiment (Experiment 2) durchgeführt, in welchem alle Zahlen gleich häufig dargeboten werden.

Die kategoriale Form des SNARC-Effekts stellt ein überraschendes Ergebnis dieses Experiments dar. Bevor darauf ausführlicher eingegangen wird, muss die in den vergangenen Abschnitten schön häufiger erfolgte Unterscheidung zwischen einem kontinuierlichen SNARC-Effekt und einem kategorialen SNARC-Effekt erläutert werden. Mit der Verwendung des Begriffs kontinuierlicher SNARC-Effekt wird sich auf ein Datenmuster bezogen, dass eine stetige Abnahme der Reaktionszeitdifferenz zwischen Reaktionen mit der rechten und linken Hand mit Zunahme der numerischen Größe beinhaltet. Dabei besteht im dRT-Verlauf keine offensichtliche Diskontinuität. Demgegenüber beschreibt der Begriff kategorialer SNARC-Effekt ein Datenmuster, in welchem einerseits eine Diskontinuität im dRT-Verlauf existiert und andererseits die Reaktionszeitvorteile, die sich mit der jeweiligen Antwortseite für ein numerisches Intervall ergeben, keine weitere Abhängigkeit von der numerischen Größe aufweisen.

Leider verzichteten Schneider und Logan (2007) in ihrem Experiment auf die Variation der Antwortseite, so dass nicht auszuschließen ist, dass die Verwendung zweier Standardzahlen zur kategorialen Form geführt hat. Experimente, in denen zum Standard 5 nur positive Vergleichszahlen dargeboten wurden, weisen widersprüchliche Ergebnisse auf. Beispielsweise wird sowohl von Gevers, Verguts et al. (2006) als auch von Nuerk et al. (2005) ein kategorialer SNARC-Effekt berichtet, die Ergebnisse von Ito und Hatta (2004) stehen dem jedoch mit einem vollständigen Fehlen einer räumlich-numerischen Assoziation entgegen. In Bull et al. (2005) wurde ein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen numerischer Größe und dRT beschrieben. Das nicht erfolgte Überprüfen der Reaktionszeiten auf einen kategorialen Zusammenhang lässt jedoch starke Kritik an der Auswertung aufkommen. Leider vermisst man in allen Untersuchungen Abbildungen der mittleren Reaktionszeiten pro Antworthand, da die Ergebnisdarstellungen stets auf die über beide Antwortseiten gemittelten Reaktionszeiten sowie die dRT-Werte beschränkt werden. Ein weiterer Kritikpunkt richtet sich auf die Auswertung in Gevers, Verguts et al., die zur Überprüfung des kategorialen Zusammenhangs eine Regression mit der kategorialen Variablen numerisches Intervall (mit dem Wert 1 für Zahlen < 5 und dem Wert 2 für Zahlen > 5) als Prädiktor und der dRT als Kriterium an die Daten anpassten. Dem kontinuierlichen Zusammenhang wurde mit einer linearen Regression nachgegangen. Im Anschluss daran wurden die erhaltenen Korrelationskoeffizienten nach der Methode von Meng, Rosenthal und Rubin (1992) gegeneinander getestet. Das Verfahren der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression aus Abschnitt 4.1.3.2 wird jedoch als vorteilhafter erachtet. Alle relevanten Koeffizienten werden mit einer Modellgleichung geschätzt. In anschließenden Modelltests kann die Angemessenheit des kontinuierlichen gegenüber dem kategorialen Modell überprüft werden. Diese Überlegungen führen zusammen mit den inkonsistenten Ergebnissen zur Form des SNARC-Effekts vergangener Untersuchungen zur Durchführung eines zweiten Kontrollexperiments (Experiment 3), in welchem nur der Standard 5 und die Vergleichszahlen 1 bis 4 sowie 6 bis 9 präsentiert werden.

4.2 Experiment 2: Kontrollexperiment zum Ausbleiben des numerischen Distanzeffekts

4.2.1 Fragestellung

Im ersten Experiment ließ sich beim numerischen Vergleich negativer und positiver Zahlen mit einem Standard (−5 bzw. 5) kein Einfluss der numerischen Differenz nachweisen. Dies deckt sich nicht mit Ergebnissen aus Experimenten, die ebenfalls das numerische Vergleichsparadigma mit einer Standardzahl anwendeten (Bull et al., 2005; Gevers, Verguts et al., 2006; Ito & Hatta, 2004; Nuerk et al., 2005). Der Unterschied zwischen den in der Literatur berichteten und dem hier durchgeführten Experiment 1 besteht u. a. in der unterschiedlichen Präsentationshäufigkeit der Vergleichszahlen. Da die Vergleichszahlen asymmetrisch um die Standardzahl angeordnet sind, hätte es eine ungleiche Verteilung von Antworten mit der linken und rechten Hand pro Standard und Sitzung gegeben. Dies sollte durch die häufigere Präsentation der Zahlen 6 bis 9 für den Standard 5 und der Zahlen −9 bis −6 für den Standard −5 ausgeglichen werden. Allerdings kann genau dieses Vorgehen zum Verschwinden des numerischen Distanzeffekts und möglicherweise zur kategorialen Form des SNARC-Effekts beigetragen haben. Mit dem nun folgenden Kontrollexperiment soll diesen Hypothesen nachgegangen werden.

4.2.2 Methode

Für die Teilnahme am Experiment wurden insgesamt 21 Versuchspersonen gewonnen. Keine der Versuchspersonen hatte an Experiment 1 teilgenommen. Alle gaben an, Rechtshänder zu sein. Eine Versuchsperson wurde nach der ersten Sitzung vom Experiment ausgeschlossen, da sie im ersten Block Reaktionszeiten von teilweise mehr als 30 s produzierte und diese selbst im vierten Block noch über 3 s lagen. Die verbleibenden 20, davon 19 weiblichen, Psychologie-Studierenden waren im Mittel 24 Jahre alt ($SD = 7$ Jahre) und erhielten für die Teilnahme am Experiment zwei Versuchspersonenstunden.

Die Aufgabe stimmte mit der aus Experiment 1 überein. In einer Sitzung sollte mit der linken (rechten) Hand reagiert werden, wenn die Vergleichszahl numerisch kleiner (größer) als der Standard war. In der anderen Sitzung lautete die Instruktion umgekehrt. Der Unterschied zu Experiment 1 bestand lediglich darin, dass alle 16 Zahlen im Bereich $[-9,\ldots,-6,-4,\ldots,-1,1,\ldots,4,6,\ldots,9]$ gleich häufig präsentiert wurden. Pro Block wurde jede Vergleichszahl mit jeder Standardzahl −5 bzw. 5 zweimal dargeboten. Insgesamt gab es pro Tastenzuordnung acht Blöcke à 67 Durchgänge, von denen die ersten drei Durchgänge als Übung galten.

4.2.3 Ergebnisse

4.2.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

In die Auswertung fließen alle Reaktionszeiten der Blöcke 3–8 mit Ausnahme der *warm-up trials* ein. Demnach werden zwölf Replikationen pro Vergleichszahl, Standard und Antwortseite berücksichtigt, auf deren Grundlage *trimmed means* mit einer *trimmed mean*-Rate von 20 % berechnet wurden (Rosenberger & Gasko, 1983).

Die von den Versuchspersonen produzierte Anzahl an Fehlern war in diesem Kontrollexperiment gering. Gemittelt über beide Sitzungen ergab sich für Aufgaben mit der Standardzahl 5 eine relative Fehlerhäufigkeit von .04 und bei Aufgaben mit der Standardzahl −5 von .06. Wie auch schon im vorangegangenen Experiment 1 wurden beim Standard −5 mehr Fehler gemacht. Das Vorliegen eines *speed-accuracy tradeoff* kann mit der Korrelation zwischen den mittleren Reaktionszeiten und relativen Fehlerhäufigkeiten über die 16 Vergleichszahlen von .836 ($p < .0005$) beim Standard −5 und von .976 ($p < .0005$) beim Standard 5 ausgeschlossen werden.

4.2.3.2 Numerischer Vergleich zum Standard 5

Erneut kann deutlich schneller auf positive Zahlen > 5 als < 5 reagiert werden ($\Delta = 100$ ms). Der numerische Distanzeffekt konnte in Experiment 1 nicht gezeigt werden und liegt in diesem Kontrollexperiment in einer eher untypischen Form vor. Während für Zahlen > 5 die Zunahme der numerischen Differenz mit einer Abnahme der Reaktionszeiten einhergeht, kehrt sich dieser Zusammenhang für Zahlen < 5 um (siehe Abbildung 4.8).

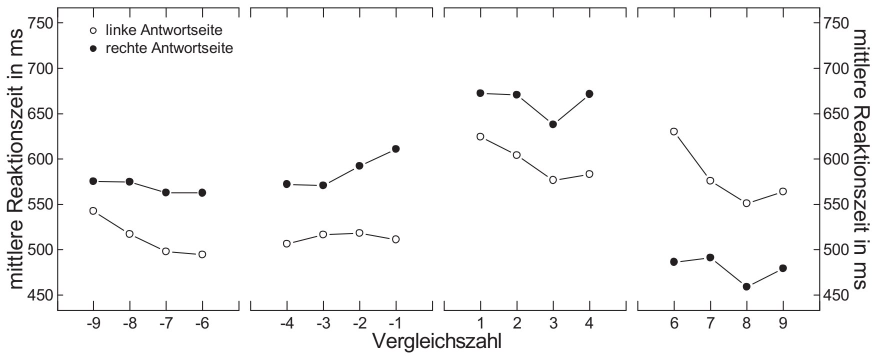


Abbildung 4.8. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und der rechten Hand in Abhängigkeit von den Vergleichszahlen für die Bedingung Standard 5.

Voranalysen zeigten, dass im Gegensatz zu Experiment 1 der in Abbildung 4.8 wiedergegebene Zusammenhang zwischen der numerischen Größe und der Antwortseite weder bei den positiven noch bei den negativen Vergleichszahlen mit der Instruktionsreihenfolge interagierte. In die varianzanalytische Auswertung der positiven Zahlen wurden aus diesem Grund nur die drei Messwiederholungsfaktoren Antwortseite (links vs. rechts), numerisches Intervall (< 5 vs. > 5) und numerische Differenz ($d = 1$ bis $d = 4$) aufgenommen. Die Ergebnisse in Tabelle 4.10 bestätigen die bisherigen Beobachtungen. Neben einem signifikanten Haupteffekt numerisches Intervall müsste aus dem nicht signifikanten Haupteffekt numerische Differenz erneut das Ausbleiben des numerischen Distanzeffekts geschlussfolgert werden. Dieser Nulleffekt entsteht, da der numerische Distanzeffekt für Zahlen < 5 und > 5 entgegengesetzt verläuft. Die signifikante Interaktion numerisches Intervall × numerische Differenz gibt genau diesen Sachverhalt wieder. Die für das Vorliegen eines räumlich-numerischen Zusammenhangs entscheidende Interaktion zwischen

Antwortseite und numerischer Größe ist signifikant. Auf Zahlen < 5 erfolgt die Reaktion 66 ms schneller mit der linken, auf Zahlen > 5 101 ms schneller mit der rechten Hand.

Tabelle 4.10

Kennwerte der dreifaktoriellen Varianzanalyse der Bedingung Standard 5 für die positiven Vergleichszahlen

Effekt	df^*	F	p
Antwortseite (A)	1,19	2.905	.105
numerisches Intervall (I)	1,19	30.524	<.0005
numerische Differenz (D)	3,57	1.897	.158 (*GG*)
A×I	1,19	14.532	.001
A×D	3,57	0.333	.801
I ×D	3,57	4.773	.009 (*GG*)
A× I ×D	3,57	3.146	.055 (*GG*)

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

Für die negativen Zahlen reduzierte sich, ohne Berücksichtigung der Instruktionsreihenfolge, die Auswertung auf eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Antwortseite (links vs. rechts) und Vergleichszahl (−9, −8, −7, −6, −4, −3, −2, −1), wobei sich lediglich ein signifikanter Effekt der Antwortseite ($F_{1,19} = 5.461$, $p = .031$) ergab. Auf alle Zahlen erfolgten Reaktionen mit der linken Hand 65 ms schneller als Reaktionen mit der rechten Hand. Die Unterschiede in den Reaktionszeiten der acht Vergleichszahlen waren statistisch nicht bedeutsam ($F_{1,133} = 0.961$, $p = .462$). Desgleichen verfehlte die Interaktion Antwortseite × Vergleichszahl mit $F_{1,133} = 0.735$ und $p = .643$ klar das Signifikanzniveau.

An die Daten wurde im zweiten Auswertungsschritt eine diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression (siehe Gleichung 4.2) angepasst. Der Prädiktor Vergleichszahl Z mit Werten im Bereich $[-9,\ldots,-6,-4,\ldots,-1,1,\ldots,4,6,\ldots,9]$ diente der Vorhersage der dRT-Werte. Die Lösungen für die einzelnen Parameter – auf ganze Zahlen gerundet – und die entsprechenden Konfidenzintervalle (in eckigen Klammern angegeben) lauten: $b_0 = 69\ [57,82]$, $b_1 = 2\ [-1,4]$, $b_2 = 15\ [-2,32]$ und $b_3 = -221\ [-273,-170]$. Die Regressionslösung liefert einen multiplen Korrelationskoeffizienten von $R^2 = .959$. Dies entspricht einer höchst zufriedenstellenden Varianzaufklärung von 96 % und stimmt in seiner Größe sehr gut mit den Varianzaufklärungen aus Experiment 1 überein. Den Zusammenhang zwischen dRT und numerischer Größe gibt Abbildung 4.9 wieder. Dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass die beiden Anstiege entgegen der Annahme des räumlich-numerischen Zusammenhangs eine positive Ausprägung besitzen, was insbesondere für den Anstieg des zweiten Geradensegments zutrifft. Dieser positive Wert ergibt sich aus den deutlich schnelleren Reaktionen mit der rechten Hand auf die Zahl 6 im Vergleich zu den restlichen Zahlen. Die Überprüfung eines Modells mit $b_2 = 0$ und $b_3 = 0$, das einen linearen Zusammenhang zwischen den Vergleichszahlen und der dRT annimmt, führte zu $F_{2,12} = 3.434$ und $p = .066$. Die leicht positiven Anstiege führen zu einem beinahe signifikanten Modelltest.

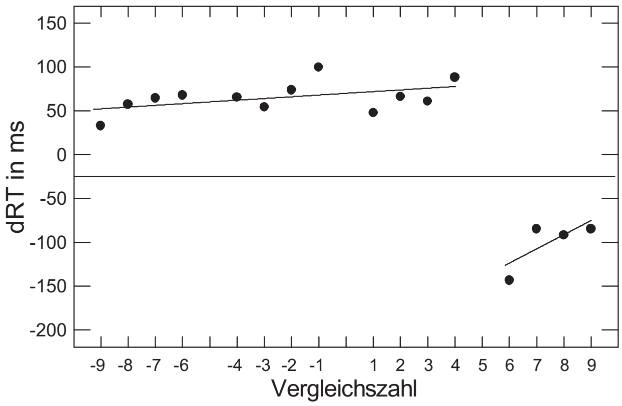


Abbildung 4.9. Der kategoriale SNARC-Effekt für den Standard 5. Die eingezeichneten Geraden stellen die Lösung der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression dar.

Die Berechnung der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression pro Versuchsperson und die sich anschließende Absicherung der errechneten Regressionskoeffizienten liefert die in Tabelle 4.11 dargestellten Ergebnisse. Lediglich der Parameter b_1 wird nicht signifikant. Der Parameter b_2 ist in seiner (positiven) Ausprägung signifikant von Null verschieden.

Tabelle 4.11

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten der Bedingung Standard 5

Koeffizient	Wert	95%-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	60	$[15, 124]$	2.672	.015
b_1	2	$[-1, 4]$	1.357	.191
b_2	15	$[1, 30]$	2.197	.041
b_3	−120	$[-338, -106]$	−4.013	.001

Anmerkung. * $df = 19$.

4.2.3.3 Numerischer Vergleich zum Standard −5

Abbildung 4.10 gibt einen Überblick zu dem aus Experiment 1 schon bekannten Datenmuster zum Standard −5. Neben einem Reaktionszeitvorteil auf numerisch kleine negative Vergleichszahlen (667 ms) gegenüber numerisch großen negativen Vergleichszahlen (704 ms) kann am schnellsten auf positive Zahlen reagiert werden (numerisch klein: 550 ms, numerisch groß: 523 ms). Zusätzlich tritt auf beiden Seiten der Standardzahl −5 der numerische Distanzeffekt auf.

Da Voranalysen einen Einfluss der Instruktionsreihenfolge aufzeigten, wurde eine vierfaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Antwortseite (links vs. rechts), numerisches Intervall (< -5 vs. > -5), numerische Differenz ($d = 1$ bis $d = 4$) und dem *between-subjects* Faktor Instruktionsreihenfolge (kompatibel-zuerst vs. inkompatibel-zuerst) auf die negativen Vergleichszahlen angewendet. Alle Ergebnisse sind ausführlich in Tabelle 4.12 dargestellt.

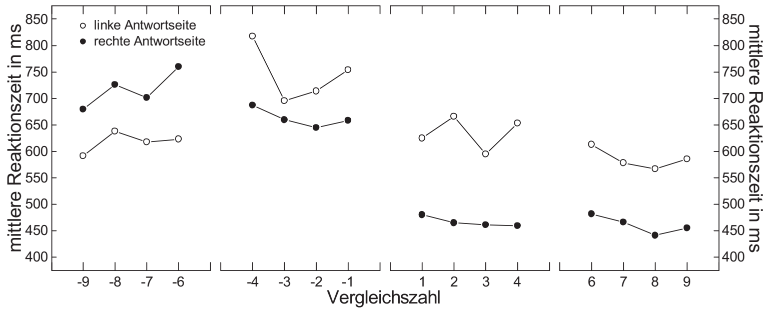


Abbildung 4.10. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und der rechten Hand in Abhängigkeit von den Vergleichszahlen für die Bedingung Standard −5.

Der Vorteil der schnelleren Beantwortung numerisch kleiner negativer Zahlen im Vergleich zu numerisch großen negativen Zahlen spiegelt sich in einem signifikanten Haupteffekt numerisches Intervall wieder. Auch das Auftreten des numerischen Distanzeffekts wird anhand des signifikanten Haupteffekts numerische Differenz abgesichert. Die mittleren Reaktionszeiten für die numerischen Differenzen von $d = 1$ bis $d = 4$ lauten: 722 ms, 669 ms, 681 ms und 671 ms. Allerdings gibt es zwischen diesen beiden Faktoren eine signifikante Interaktion.

Tabelle 4.12

Kennwerte der vierfaktoriellen Varianzanalyse der Bedingung Standard −5 für die negativen Vergleichszahlen

Effekt	df^*	F	p
Instruktionsreihenfolge (R)	1,18	3.045	.098
Antwortseite (A)	1,18	0.526	.478
numerisches Intervall (I)	1,18	7.798	.012
numerische Differenz (D)	3,54	7.143	.002 (*GG*)
A×R	1,18	2.837	.109
I×R	1,18	0.118	.735
D×R	3,54	0.145	.865 (*GG*)
A×I	1,18	13.924	.002
A×D	3,54	0.4	.687 (*GG*)
I×D	3,54	4.356	.018 (*GG*)
A×I×R	1,18	6.93	.017
A×D×R	3,54	0.546	.444 (*GG*)
I×D×R	3,54	0.17	.857 (*GG*)
A×I×D	3,54	3.98	.021 (*GG*)
A×I×D×R	3,54	0.103	.928 (*GG*)

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

Für das Vorhandensein des SNARC-Effekts spricht die signifikante Interaktion zwischen Antwortseite und numerischem Intervall. Die Instruktionsreihenfolge beeinflusst diesen Zusammenhang erneut, was in der signifikanten Dreifachinteraktion zum Ausdruck kommt. Für Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung mit der kompatiblen Zuordnung arbeiteten, war der Zusammenhang zwischen dem numerischen Intervall und der Antwortseite weniger stark ausgeprägt. Hingegen liegt bei Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung das inkompatible *mapping* verwendeten eine deutliche SNARC-Interaktion vor. Abbildung 4.11 soll zur Verdeutlichung dieses Befundes hilfreich sein.

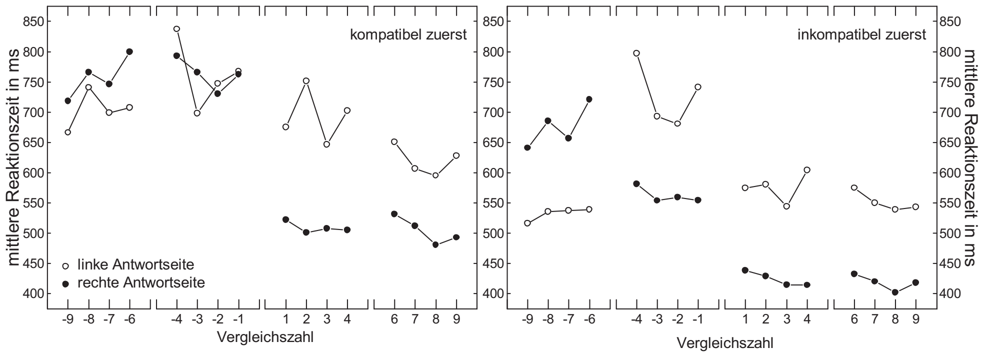


Abbildung 4.11. Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und rechten Hand in der Bedingung Standard −5 getrennt für die zwei Kombinationen der Instruktionsreihenfolge. <u>Links:</u> kompatible Instruktion zuerst, <u>rechts:</u> inkompatible Instruktion zuerst.

Im positiven Zahlenbereich erbrachten Voranalysen keinen Einfluss der Instruktionsreihenfolge (siehe Abbildung 4.11). Dadurch reduzierte sich die Auswertung auf eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Messwiederholungsfaktoren Antwortseite und Vergleichszahl. Abbildung 4.10 ist zu entnehmen, dass mit der rechten Hand im Vergleich zur linken Hand deutlich schneller reagiert werden kann. Dies wird durch einen signifikanten Haupteffekt Antwortseite bestätigt ($F_{1,19}$ = 31.004, p < .0005). Ebenso signifikant werden der Haupteffekt Vergleichszahl ($F_{7,133}$ = 5.126, p = .002 nach GG) sowie die Interaktion Antwortseite × Vergleichszahl ($F_{7,133}$ = 2.956, p = .027 nach GG). Aus Abbildung 4.10 wird ersichtlich, dass die deutlich erhöhten Reaktionszeiten auf die Vergleichszahlen 2 und 4 dafür verantwortlich sein könnten.

Bezüglich der regressionsanalytischen Auswertung gibt es – wie in Abbildung 4.12 ersichtlich – zu Experiment 1 deutliche Unterschiede, da die Datenpunkte eine stärkere Streuung um die Regressionsgerade aufweisen. Die Schätzung der Parameter der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression (Gleichung 4.5) liefert die folgenden Werte mit ihren entsprechenden Konfi-

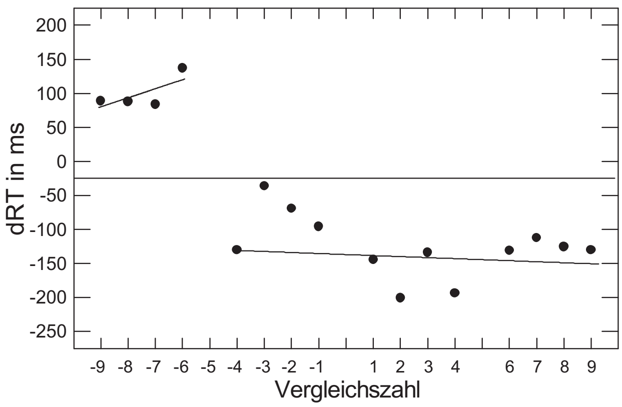


Abbildung 4.12. Der kategoriale SNARC-Effekt für den Standard −5. Die beiden Geraden stellen die Lösung der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression dar.

denzintervallen (in eckigen Klammern angegeben): $b_0 = 205$ $[-101, 511]$, $b_1 = 14$ $[-26, 55]$, $b_2 = -18$ $[-58, 23]$ und $b_3 = -230$ $[-352, -107]$. Diese Regressionslösung liefert einen multiplen Korrelationskoeffizienten von $R^2 = .883$. Die Varianzaufklärung von 89 % kann noch immer als zufriedenstellend bezeichnet werden. Der Modelltest auf eine linearen Zusammenhang zwischen den Vergleichszahlen und der dRT ($b_2 = 0$ und $b_3 = 0$) liefert eine Kenngröße von $F_{2,12} = 13.627$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = .001$; der simultane Modelltest der beiden Parameter auf Null wird signifikant. Passt man an die Daten jedoch ein reduziertes kategoriales Modell an, in welchem nur noch die beiden Parameter b_0 und b_3 enthalten sind, ergibt der Modelltest die Angemessenheit dieses eingeschränkten Modells ($F_{2,12} = 1.273$, $p = .315$), was impliziert, dass b_1 und b_2 nicht verschieden von Null sind.

Abschließend wurde die diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression an die Daten jeder Versuchsperson angepasst und die so erhaltenen Regressionskoeffizienten gegen Null getestet. Diesbezüglich verstärkt Tabelle 4.13 noch einmal die Bedeutung der beiden Parameter b_0 und b_3. Aus den breiten Konfidenzintervallen geht zusätzlich die starke Streuung der Daten hervor.

Tabelle 4.13

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten der Bedingung Standard −5 *(Werte auf ganze Zahlen gerundet)*

Koeffizient	Wert	95 %-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	205	$[-3, 412]$	2.067	.053
b_1	14	$[-11, 39]$	1.186	.253
b_2	−18	$[-48, 12]$	−1.259	.223
b_3	−230	$[-363, -97]$	−3.619	.002

Anmerkung. * $df = 19$.

Mit Blick auf Abbildung 4.12 könnte ein Einwand lauten, dass für den Bereich der negativen Zahlen durchaus ein linearer Zusammenhang zu finden ist. Dieser würde jedoch nicht aufgedeckt werden, da in die Berechnung des Anstieges des zweiten Geradensegments auch alle positiven Zahlen einfließen. Aus diesem Grund wurde die Regressionsanalyse zum Standard −5 unter Berücksichtigung dieses Aspekts erneut durchgeführt, wobei nur negative Zahlen als Prädiktor in die Analyse aufgenommen wurden. Auf diese Weise erhält man die Koeffizienten: $b_0 = 205$ $[-143, 553]$, $b_1 = 14$ $[-32, 60]$, $b_2 = -7$ $[-72, 58]$ und $b_3 = -235$ $[-412, -58]$. Der Determinationskoeffizient von $R^2 = .925$ verbessert sich im Vergleich zum oben erhaltenen Determinationskoeffizienten von $R^2 = .883$ geringfügig, was einer zusätzlichen Varianzaufklärung von knapp 4 % entspricht. Überprüft man nun, ob die Daten durch einen einfachen linearen Zusammenhang beschrieben werden können ($b_2 = 0$ und $b_3 = 0$), so bestätigt der Wert $F_{2,4} = 6.777$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = .05$, dass das vollständige Modell angemessener ist. Vergleicht man das vollständige Modell hingegen mit einem Modell, dass einen kategorialen Zusammenhang annimmt, so fällt die Entscheidung zugunsten des kategorialen Modells aus ($F_{2,4} = 0.455$, $p = .664$). Die Daten können demzufolge am besten durch ein kategoriales Modell beschrieben werden.

4.2.4 Diskussion

Mit diesem Kontrollexperiment sollte der Frage nachgegangen werden, ob der in Experiment 1 gefundene kategoriale SNARC-Effekt sowie der fehlende Einfluss der numerischen Differenz durch die häufigere Präsentation der Zahlen −9 bis −6 beim Standard −5 und 6 bis 9 beim Standard 5 zustande kam. Beim Standard −5 trat für negative Vergleichszahlen ein deutlicher Distanzeffekt auf. Ebenso konnte der numerische Distanzeffekt für Zahlen > 5 gezeigt werden, wohingegen bei positiven Zahlen < 5 ein umgekehrter Distanzeffekt zu verzeichnen war: Mit Zunahme der numerischen Distanz stieg die Reaktionszeit an. Die Ergebnisse zum SNARC-Effekt beim Standard −5 sowie 5 untermauern den kategorialen Zusammenhang zwischen der Antwortseite und der numerischen Größe aus Experiment 1 noch einmal sehr deutlich. Der Einfluss der Instruktionsreihenfolge ließ sich jedoch nur für den numerischen Vergleich negativer Zahlen mit der Standardzahl −5 replizieren.

Die Befunde zum numerischen Distanzeffekt verdeutlichen zwei Aspekte. Einerseits kann damit belegt werden, dass die häufigere Präsentation einiger Zahlen als Erklärung für den fehlenden Einfluss der numerischen Differenz in Experiment 1 verantwortlich zu sein scheint. Mit diesem Ergebnis kann davon ausgegangen werden, dass zumindest für den numerischen Vergleich negativer Zahlen zum Standard −5 als auch für den numerischen Vergleich positiver Zahlen zum Standard 5 auf die numerische Größenrepräsentation zugegriffen wurde. Andererseits entstanden beim numerischen Vergleich positiver Zahlen mit der Standardzahl −5 sowie negativen Zahlen mit der Standardzahl 5 Reaktionszeiten, die nicht von der numerischen Differenz zur jeweiligen Standardzahl abhingen.

Zugleich erfuhr die kategoriale Form des SNARC-Effekts eine Replikation. Auf Zahlen, die numerisch kleiner als der jeweilige Standard waren, konnte schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand reagiert werden. Umgekehrt erfolgte die Antwortabgabe auf Zahlen, die numerisch größer als die jeweilige Standardzahl waren, schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand.

Die Vorhersagen eines Zahlenstrahl-Modells mit Ausweitung in den negativen Zahlenbereich finden damit weitgehend Bestätigung. Negative Zahlen weisen eine Assoziation mit ‚links‘ und positive Zahlen eine Assoziation mit ‚rechts‘ auf. Dennoch stellt die kategoriale Form des SNARC-Effekts die in der Literatur vorherrschende Meinung, die räumlich-numerische Assoziation sei eine Eigenschaft des mentalen Zahlenstrahls, zweifellos in Frage. Der kontinuierliche Zusammenhang zwischen der numerischen Größe und der dRT wurde bisher hauptsächlich mit Aufgabenstellungen erfasst, in denen die numerische Größe für die Beantwortung irrelevant war. Zu nennen wären beispielsweise Aufgaben zum *phonem-monitoring* (z. B. Fias, 2001) oder die vielfach zum Einsatz kommenden Paritätsurteile (z. B. Dehaene et al., 1993; Müller & Schwarz, 2007b; Schwarz & Keus, 2004; Schwarz & Müller, 2006). Die generelle Interpretation dieses kontinuierlichen Zusammenhangs lautet stets, mit Zunahme der numerischen Größe würde deren Assoziation mit ‚rechts‘ und mit Abnahme der numerischen Größe deren Assoziation mit ‚links‘ ansteigen. Bei Gültigkeit dieser Aussage müsste die räumlich-numerische Assoziation in ihrer kontinuierlichen Form erst recht mit solchen Aufgaben gezeigt werden können, in denen die numerische Größe das für das Urteil der Versuchsperson relevante Merkmal darstellt. Die numerische Vergleichsaufgabe erfüllt diese Bedingung der Aufgabenrelevanz der numerischen Größe. Zudem belegt der numerische Distanzeffekt eindeutig, dass auf die mentale Größenrepräsentation zugegriffen wurde. Dennoch ist in den Ergebnissen kein kontinuierliche Zusammenhang zu finden. Vielmehr besagen die Ergebnisse zum numerischen Vergleich mit einem Standard, dass – ohne weitere Differenzierung – alle Zahlen kleiner dem Standard mit ‚links' und alle Zahlen größer dem Standard mit ‚rechts' assoziiert werden. Dies erlaubt lediglich die Schlussfolgerung, dass eine Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' existiert, der Bezug zum mentalen Zahlenstrahl wäre überflüssig. Diese weitreichenden Schlussfolgerungen würden die gesamte Interpretation zum SNARC-Effekt in Frage stellen. Vorher muss jedoch ausgeschlossen werden, dass der kategoriale SNARC-Effekt durch die zusätzliche Präsentation negativer Zahlen zustande kam. Die in Abschnitt 4.1.4 angeführte Kritik an den bisherigen Untersuchungen zum SNARC-Effekt mittels numerischen Vergleiches begründen zusätzlich die Durchführung eines weiteren Kontrollexperiments.

4.3 Experiment 3: Der kategoriale SNARC-Effekt

4.3.1 Fragestellung

In zwei Experimenten (Experiment 1 und 2) zum numerischen Vergleich einer Standardzahl (−5 bzw. 5) mit negativen und positiven Vergleichszahlen lag der SNARC-Effekt in einer kategorialen Form vor. Numerische Vergleichsurteile konnten schneller mit einem rechten im Vergleich zu einem linken Tastendruck abgegeben werden, wenn die Vergleichszahl numerisch größer als der Standard war. Waren die Vergleichszahlen hingegen numerisch kleiner als der Standard, konnte darauf schneller mit einem linken im Vergleich zu einem rechten Tastendruck reagiert werden. Innerhalb des jeweiligen numerischen Intervalls war jedoch keine weitere Differenzierung der Reaktionszeiten zu verzeichnen. Dieses Ergebnis widerspricht der bisherigen Interpretation, die räumlich-numerische Assoziation sei eine Eigenschaft der mentalen Größenrepräsentation. Wie schon mehrfach berichtet, weisen selbst die wenigen empirischen Arbeiten für den positiven Zahlenbereich widersprüchliche Ergebnisse zur Form des SNARC-Effekts auf (Bull et al., 2005; Gevers, Verguts et al., 2006; Ito & Hatta, 2004). Dies wird zum Anlass genommen, ein Kontrollexperiment durchzuführen, in welchem der numerische Vergleich ausschließlich positiver Zahlen mit der Standardzahl 5 gefordert ist. Ergibt sich auch mit dieser Versuchsanordnung ein kategorialer Zusammenhang zwischen der numerischen Größe und der Antwortseite, so kann die bisherige Interpretation des SNARC-Effekts zumindest für den numerischen Vergleich mit einer Standardzahl nicht länger beibehalten werden.

4.3.2 Methode

Versuchspersonen Für dieses Kontrollexperiment konnten elf Rechtshänder und ein Linkshänder rekrutiert werden, keine der Versuchspersonen hatte an den ersten beiden Experimenten teilgenommen. Das mittlere Alter der acht weiblichen und vier männlichen Versuchspersonen betrug 28 Jahre (SD = 5 Jahre). Die Teilnahme erfolgte ohne Vergütung.

Poweranalyse Da bei Gültigkeit des kategorialen SNARC-Effekts die beiden Anstiege der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression mit der Vergleichszahl als Prädiktor und der dRT als Kriterium nicht verschieden von Null sein sollten, wurde eine Poweranalyse durchgeführt. Das arithmetische Mittel der pro Versuchsperson ermittelten Regressionskoeffizienten soll jeweils mittels Ein-Stichproben-t-Test gegen Null abgesichert werden. GPOWER (Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, 2007) liefert für ein Signifikanzniveau von $\alpha = .05$, einer Effektstärke $d = 0.8$ bei gegebener Power $(1-\beta) > .8$ eine Stichprobengröße von $n = 12$.

Aufgabe In jedem Durchgang wurde eine positive Zahl präsentiert, für die angegeben werden sollte, ob sie numerisch größer oder kleiner als die Standardzahl 5 ist.

Stimuli Verwendet wurden vier positive Zahlen, die numerisch kleiner als die Standardzahl 5 sind (1, 2, 3, 4) und vier positive Zahlen die numerisch größer als die Standardzahl 5 sind (6, 7, 8, 9). Die schwarzen Ziffern wurden vor einem weißem Hintergrund dargestellt. Obwohl keine negativen Zahlen im Stimulusmaterial enthalten waren, wurden zur Vergleichbarkeit mit Experiment 1 und 2 die Standardzahl und die Vergleichszahlen mit einem Pluszeichen versehen.

Versuchsdurchführung Jede Versuchsperson absolvierte eine Sitzung à vier Blöcke. In je zwei aufeinander folgenden Blöcken wurde eine Instruktion realisiert. Eine Hälfte der Versuchspersonen erhielt in den ersten beiden Blöcken die kompatible Tastenzuordnung. Sie sollten mit der linken Hand auf Vergleichszahlen < 5 und mit der rechten Hand auf Vergleichszahlen > 5 reagieren. In den letzten beiden Blöcken wurde die inkompatible Tastenzuordnung mit der linken Taste für > 5 und der rechten Taste für < 5 vorgegeben. Die andere Hälfte der Versuchspersonen erhielt in den Blöcken 1 und 2 die inkompatible, in den Blöcken 3 und 4 die kompatible Tastenzuordnung. In jedem Block gab es $3 + 64$ Durchgänge, pro Block wurde jede Zahl 8-mal repliziert. Insgesamt bearbeiteten die Versuchspersonen 2 (Antwortseite) × 8 (Vergleichszahl) × 16 (Replikationen) = 256 experimentelle Durchgänge.

Die Versuchsdurchführung stimmte mit der aus Experiment 1 und 2 überein. Den Beginn eines Durchgangs kennzeichnete ein Rechteck (400 ms). Nach weiteren 400 ms erschien die Standardzahl 5 für 500 ms. Das ISI betrug 400 ms, dem sich die Präsentation der Vergleichszahl anschloss. Mit der Antwortabgabe per Tastendruck begann das variable ITI von 1000–1500 ms. Die Größen- und Sehwinkelangaben der Reize stimmten mit denen aus Experiment 1 überein.

Versuchsplan In diesem Experiment stellen die Antwortseite (links vs. rechts) und die Vergleichszahlen $(1, \ldots, 4, 6, \ldots, 9)$ zwei unabhängige Variablen dar. Es handelt sich bei allen Variablen um Messwiederholungsfaktoren. Erfasst wurden Reaktionszeiten und Fehlerraten.

Geräte Die verwendete Apparatur entspricht vollständig der aus Experiment 1.

4.3.3 Ergebnisse

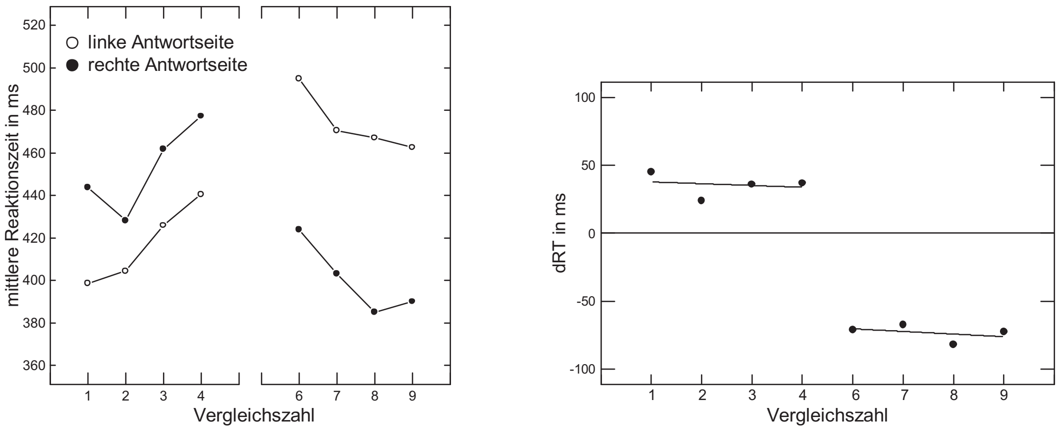
4.3.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

Die ersten 19 Durchgänge (3 *warm-ups* + 2 Replikationen) des ersten und dritten Blocks galten als Übung und gehen nicht in die Analyse ein. Des Weiteren zählten die ersten drei Durchgänge des zweiten und vierten Blocks als *warum-ups* und werden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Für jede Versuchsperson ergeben sich 14 Replikationen pro Vergleichszahl und Instruktion, auf deren Grundlage *trimmed means* mit einer *trimmed mean*-Rate von 20 % berechnet wurden (Rosenberger & Gasko, 1983).

Die mittleren relativen Fehlerhäufigkeiten liegen bei .033 und können als sehr gering bezeichnet werden. In die Berechnung der Korrelation zwischen den mittleren Reaktionszeiten und den relativen Fehlerhäufigkeiten wurde pro Vergleichszahl über Versuchspersonen gemittelt. Aufgrund der Korrelation von $r = .775$ ($p = .025$) kann ein *speed-accuracy tradeoff* somit ausgeschlossen werden.

4.3.3.2 Der SNARC-Effekt im positiven Zahlenbereich

Abbildung 4.13 fasst die Ergebnisses des Kontrollexperiments zusammen. Einerseits nehmen die mittleren Reaktionszeiten ab, je weiter die Vergleichszahl von der Standardzahl 5 entfernt ist (siehe Abbildung 4.13a). Andererseits zeigt diese Abbildung recht deutlich, dass auf Zahlen < 5 schneller mit der linken Hand und auf Zahlen > 5 schneller mit der rechten Hand reagiert wird.



(a) Der numerische Distanzeffekt. *(b)* Der SNARC-Effekt.

Abbildung 4.13. (a) Mittlere Reaktionszeiten mit der linken und rechten Antwortseite und (b) mittlere Reaktionszeitdifferenzen (dRT) in Abhängigkeit von der Vergleichszahl. Die beiden Geraden stellen die Lösung der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression dar.

Zur Überprüfung dieser Zusammenhänge wurde eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit den Messwiederholungsfaktoren Antwortseite (links vs. rechts), numerisches Intervall (< 5 vs. > 5) und numerische Differenz (d = 1 bis d = 4) gerechnet. Der Haupteffekt Antwortseite wird signifikant ($F_{1,11} = 7.393$, $p = .02$); die Reaktionen werden mit der linken Hand im Mittel nach 446 ms und mit der rechten Hand im Mittel nach 427 ms abgegeben. Hinsichtlich der beiden numerischen Intervalle ergibt sich kein signifikanter Unterschied ($F_{1,11} = 0.281$, $p = .606$). Auf Zahlen < 5 bzw. > 5 entstehen Reaktionszeiten von 435 ms bzw. 437 ms. Der numerische Distanzeffekt äußert sich in einem signifikanten Haupteffekt numerische Differenz ($F_{3,33} = 14.786$, $p < .0005$ nach GG). Die mittleren Reaktionszeiten auf die numerischen Differenzen d = 1 bis d = 4 lauten: 459 ms, 440 ms, 421 ms und 424 ms. Die für das Kontrollexperiment ausschlaggebende Interaktion Antwortseite × numerisches Intervall wird signifikant ($F_{1,11} = 18.491$, $p = .001$). Wie aus Abbildung 4.13a deutlich hervorgeht, kann auf Zahlen < 5 schneller mit der linken (417 ms) im Vergleich zur rechten Hand (453 ms) reagiert werden. Für Zahlen > 5 ergeben sich kürzere Reaktionszeiten für Antworten mit der rechten (401 ms) im Vergleich zur linken Antworthand (474 ms). Alle weiteren Interaktionen verfehlen das Signifikanzniveau (alle $F < 1$).

Aus der Varianzanalyse resultierte eine signifikante Interaktion zwischen der Antwortseite und dem numerischen Intervall. In einem zweiten Schritt wurde der Form dieses Zusammenhangs (kategorial vs. kontinuierlich) mittels diskontinuierlicher abschnittsweise linearer Regression (vgl. Gleichung 4.2) mit dem Prädiktor Vergleichszahl Z und dem Unterbrechungspunkt $bp = 5$ nachgegangen. Es ergeben sich die folgenden Parameter (und in eckigen Klammern die 95 %-Konfidenzintervalle): $b_0 = 39$ $[8, 69]$, $b_1 = -1$ $[-12, 10]$, $b_2 = -1$ $[-16, 15]$ und $b_3 = -101$ $[-144, -57]$. Der multiple Korrelationskoeffizient beträgt $R^2 = .986$. Die Lösung der diskontinuierlichen abschnittweise linearen Regression ist in Abbildung 4.13b eingezeichnet. Überprüft man ein lineares Modell durch das simultane Nullsetzen der Parameter $b_2 = b_3 = 0$, so sagt das signifikante Ergebnis aus, dass das vollständige Modell angemessener ist ($F_{2,4} = 20.874$ und $p = .008$). Die inferenzstatistische Überprüfung eines Modells mit simultan auf Null gesetzten Parametern b_1 und b_2 ergibt, dass sich die Modelle nicht unterscheiden ($F_{2,4} = 0.164$ und $p = .854$). Dies impliziert, dass auf die Parameter b_1 und b_2 verzichtet werden kann. Es kann festgehalten werden, dass ein Modell mit zwei Geradenabschnitten, deren Anstiege nicht von Null verschieden sind, am besten auf die Daten passt. Die auf die Achsenabschnitte reduzierten Geradengleichungen lauten:

$$dRT = \begin{cases} 39 & \text{für } Z < 5 \\ -62 & \text{für } Z > 5. \end{cases} \tag{4.7}$$

In einem letzten Schritt wurde die diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression an jede Versuchsperson angepasst. Die so erhaltenen Koeffizienten wurden anschließend gegen Null getestet (Lorch & Myers, 1990). Die Ergebnisse fasst Tabelle 4.14 zusammen.

Tabelle 4.14

Ergebnisse der Ein-Stichproben-t-Tests für die vier Regressionskoeffizienten

Koeffizient	Wert	95%-Konfidenzintervall	t-Wert*	p
b_0	39	$[10, 67]$	3.009	.012
b_1	−1	$[-8, 6]$	−0.408	.691
b_2	−1	$[-13, 11]$	−0.116	.911
b_3	−101	$[-188, -13]$	−2.532	.028

Anmerkung. * $df = 11$.

Die Ergebnisse aus Tabelle 4.14 stimmen gut mit den eben berichteten Modelltests überein. Lediglich die beiden Parameter b_0 und b_3 werden signifikant, d. h. es zeigt sich erneut eine kategoriale Form des SNARC-Effekts.

4.3.4 Diskussion

Die Ergebnisse dieses Kontrollexperiments lassen sich mit einem auf beiden Seiten der Standardzahl 5 auftretenden numerischen Distanzeffekt und einem kategorialen SNARC-Effekt zusammenfassen. Somit wird die kategoriale Form des SNARC-Effekts ein weiteres Mal bestätigt, wenn die Aufgabe darin besteht, einen numerischen Vergleich mit einer Standardzahl durchzuführen. Aus den Ergebnissen des Kontrollexperiments kann geschlossen werden, dass der kategoriale SNARC-Effekt in den Experimenten 1 und 2 nicht durch die Verwendung zweier Standardzahlen oder die zusätzliche Präsentation negativer Zahlen zustande kam.

Die erhaltenen Ergebnisse stimmen gut mit denen von Gevers, Verguts et al. (2006) und Nuerk et al. (2005) überein und stehen im Widerspruch zum Nulleffekt von Ito und Hatta (2004). In ihrer jüngst veröffentlichten Metaanalyse sichteten Wood, Willmes, Nuerk und Fischer (2008) neun Untersuchungen, in denen Versuchspersonen numerische Vergleichsurteile abgeben sollten. Die Autoren gelangten zu dem Ergebnis, dass der SNARC-Effekt eher eine kategoriale Form aufweist. Nur in zwei der neun gesichteten Artikel wurden kontinuierliche Zusammenhänge gefunden. Dies betrifft die Ergebnisse von Shaki und Petrusic (2005) zum Vergleich zweier gleichzeitig präsentierter Zahlen sowie ein Experiment von Bachot, Gevers, Fias und Roeyers (2005), in welchem Kinder mit visuell-räumlichen Defiziten untersucht wurden. Auch Bull et al. (2005) berichteten einen kontinuierlichen SNARC-Effekt. Allerdings reanalysierten Wood et al. (2008) deren Daten und konnten auch in dieser Untersuchung die kategoriale Form des SNARC-Effekts nachweisen. Neben den schon berichteten Publikationen zum numerischen Vergleich mit Standard 5 wurde auch für die Daten von Fischer und Rottmann (2005, Exp. 2) zur mentalen Repräsentation negativer Zahlen und von Baechtold et al. (1998) zum Vergleich von Uhrzeiten bzw. Abständen auf einem Lineal eine kategoriale Form des SNARC-Effekts angegeben. Zusätzlich liefert eine Untersuchung mit blinden Versuchspersonen einen weiteren Beleg für den kategorialen SNARC-Effekt (Castronovo & Seron, 2006; zit. nach Wood et al., 2008).

Durch die unterschiedlichen Formen des SNARC-Effekts ist die Auseinandersetzung mit der Frage, was mit dem SNARC-Effekt eigentlich gemessen wird, unumgänglich. Wie in den vergangenen Abschnitten immer wieder betont, kann die numerisch-räumliche Assoziation als einzige Ursache nicht für beide Formen herangezogen werden. Lediglich Gevers, Verguts et al. (2006) diskutieren die unterschiedlichen Ergebnisse zur Form des SNARC-Effekts. Die Autoren führen an, dass die kontinuierliche Form aufgrund des Zusammenwirkens von numerischer Differenz und dem zeitlichen Verlauf des SNARC-Effekts unterbrochen wird und sich infolgedessen auf eine kategoriale Form reduziert. Zur Betrachtung des zeitlichen Verlaufs des SNARC-Effekts wendeten sie die Methode von Ratcliff (1979) an. Pro Versuchsperson und Bedingung werden dazu alle Reaktionszeiten der Größe nach geordnet und dann in vier gleich große Intervalle unterteilt. Im Anschluss daran wird pro Intervall der Mittelwert (über die Versuchspersonen) berechnet. Mit der Überprüfung des SNARC-Effekts pro Intervall ergab sich, dass dieser eine umso stärkere Ausprägung aufwies, je größer die mittlere Reaktionszeit des Intervalls war. Daraus schlussfolgerten die Autoren, eine größere Reaktionszeit gehe mit einer stärkeren Aktivierung der numerisch-räumlichen Assoziation einher. Beim numerischen Vergleich mit der Standardzahl 5 ergäben sich gerade für Zahlen nahe dem Standard größere Reaktionszeiten, weshalb sich die räumlich-numerische Assoziation bei diesen Zahlen besonders stark auswirke. Dadurch würden die dRT-Werte für die Zahl 4 noch positiver und für die Zahl 6 noch negativer werden, was eine kategoriale Form entstehen ließe. Trotz Plausibilität dieser Erklärung kommen mit den Ergebnissen von Fias (2001) sowie Mapelli, Rusconi und Umiltà (2003) Zweifel daran auf, da diese die Abhängigkeit des SNARC-Effekts von der Reaktionszeit nicht nachweisen konnten. Unabhängig davon ist völlig ungeklärt, wodurch die erhöhten Reaktionszeiten zustande kommen, die mit einem stärkeren SNARC-Effekt einhergehen sollten.

Die kategoriale Form beschränkt die Interpretation der Daten auf eine Assoziation von ‚klein' mit ‚links' sowie ‚groß' mit ‚rechts'. Eben diesen kategorialen Zusammenhang könnte das Polaritätskorrespondenz-Prinzip von Proctor und Cho (2006) vorhersagen (siehe Abschnitt 2.2.3.2). Numerisch kleine Zahlen werden mit ‚–' und numerisch große Zahlen mit ‚+' sowie die Antwort ‚links' mit ‚–' und die Antwort ‚rechts' mit ‚+' codiert. Diese Codierung führt bei Antworten mit der linken Hand auf numerisch kleine Zahlen bzw. mit der rechten Hand auf numerisch große Zahlen zu einer Übereinstimmung und infolgedessen zu den schnelleren Reaktionen. Leider beziehen sich Proctor und Cho auf die Ergebnisse von Dehaene et al. (1993), die bekanntlich einen kontinuierlichen Zusammenhang zwischen numerischer Größe und dRT nachwiesen. Genau an dieser kontinuierlichen Form scheitert der Ansatz, da dann die binäre durch eine feinere Abstufung der Stimuluscodes erweitert werden müsste. Würden jedoch feinere Abstufungen existieren, so dürfte die kategoriale Form nicht mehr auftreten.

Bisher existiert in der Literatur kein Ansatz, der beide Formen des SNARC-Effekts in sich vereinen kann. Wie weiter oben argumentiert, lassen die unterschiedlichen Formen des SNARC-Effekts berechtigte Zweifel an der räumlich-numerischen Assoziation aufkommen. Im Folgenden soll deshalb der Versuch unternommen werden, ein Modell zu entwickeln, mit dem beide SNARC-Formen vorhergesagt werden können. Dies soll zunächst für die Standardzahl 5 und die Vergleichszahlen 1–4 sowie 6–9 erfolgen. Das Modell lehnt sich größtenteils an die Ausführungen von Müller und Schwarz (2007a) an, die auf ähnliche Weise den kontinuierlichen SNARC-Effekt bei Paritätsurteilen modellieren (vgl. Abschnitt 2.2.3.2 sowie Abbildung 2.6). Dabei wurde auf die Annahme zurückgegriffen, dass die Informationsverarbeitung in drei seriell organisierte Subprozesse unterteilt werden kann (Sternberg, 1969). Auf der ersten Stufe wird der Reiz identifiziert und enkodiert. Als nächstes folgt eine Stufe, in der die dem Reiz zugehörige Antwort ausgewählt wird, welcher sich die Stufe der Initiierung und Abgabe der Antwort anschließt.

Für die Erweiterung dieses Modells auf den numerischen Vergleich mit einer Standardzahl müssen zunächst die Unterschiede zwischen der Paritäts- und der numerischen Vergleichsaufgabe erläutert werden. Wie schon des Öfteren betont, liegt der Hauptunterschied in der Relevanz der numerischen Größe. Ein genauerer Blick auf die einzelnen Verarbeitungsstufen lässt einen weiteren wichtigen Unterschied auf der Stufe der Enkodierung und Identifizierung erkennen. In der Paritätsaufgabe wird nur eine Zahl pro Durchgang bearbeitet. Geht man nun davon aus, dass tatsächlich eine räumlich-numerische Assoziation existiert, so aktiviert die numerische Größe entsprechend ihrer Position auf dem mentalen Zahlenstrahl einen räumlichen Code und damit eine Antwortseite. Da diese räumlich-numerische Assoziation in Bezug auf die numerische Größe eine graduelle Abstufung aufweist, entsteht die kontinuierliche Form des SNARC-Effekts (Müller & Schwarz, 2007a). In der numerischen Vergleichsaufgabe müssen in jedem Durchgang zwei Zahlen verarbeitet werden. Die Vergleichszahl variiert von Durchgang zu Durchgang und aktiviert entsprechend ihrer Position auf dem mentalen Zahlenstrahl eine Antwortseite. Die Standardzahl 5 bleibt hingegen in jedem Durchgang unverändert, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass ihre entsprechende mentale Größenrepräsentation voraktiviert ist. Da die Standardzahl die Mitte des präsentierten Zahlenintervalls bildet, sollte sie weder die linke noch die rechte Antwortseite aktivieren. In dem Modell wird angenommen, dass die Antwortseiten-Aktivierungen der beiden Zahlen gemeinsam verrechnet werden und die Standardzahl durch ihre Voraktivierung in der Verrechnung stärker gewichtet wird. Dadurch wirkt sich die Antwortseiten-Aktivierung der Standardzahl stärker aus und hemmt im Falle der Standardzahl 5 die Aktivierung der Antwortseite der Vergleichszahl. Die durch die Vergleichszahl aktivierte Antwortseite würde dadurch die Stufe der Antwortauswahl nur noch geringfügig beeinflussen. Dies wiederum bedeutet, dass sich die räumlich-numerische Assoziation der Vergleichszahl kaum auf die Reaktionszeiten auswirkt.

Gleichzeitig findet auf der Stufe der Enkodierung der numerische Vergleich der Standardzahl mit der Vergleichszahl statt. Die entscheidende Annahme lautet nun, dass es eine natürliche Zuordnung von ‚klein' zu ‚links' und ‚groß' zu ‚rechts' gibt, was eine kompatible (links-klein und rechts-groß) und eine inkompatible Tastenzuordnung (links-groß und rechts-klein) zur Folge hat. Das Entstehen des kategorialen SNARC-Effekts wird nun darauf zurückgeführt, dass sich einerseits die räumlich-numerischen Assoziationen der Standard- und Vergleichszahl aufheben und andererseits schnellere Antworten mit der kompatiblen im Vergleich zur inkompatiblen Tastenzuordnung abgegeben werden. Da die postulierte natürliche Zuordnung kategorialer Natur ist und sich die räumlich-numerische Assoziation der Vergleichszahl nicht auf die Antwortauswahl auswirkt, erhält der SNARC-Effekt seine kategoriale Form.

Zwei Annahmen des Modells müssen näher erläutert werden. Die erste Annahme bezieht sich darauf, dass die Standardzahl 5 aufgrund ihrer numerischen Mitte keine Antwortseite automatisch aktiviert. Die Abhängigkeit des SNARC-Effekts vom verwendeten Zahlenintervall (Dehaene et al., 1993, Exp. 3) kann dafür als Beleg angeführt werden. Die Reaktionen erfolgen schneller mit der linken oder rechten Hand, je nachdem ob eine bestimmte Zahl zu den numerisch kleinen oder den numerisch großen Zahlen des verwendeten Zahlenintervalls gehört. Daraus könnte man schlussfolgern, dass Zahlen aus der Mitte des präsentierten Zahlenintervalls keine bevorzugte Antwortseite aktivieren. Ein einfaches Experiment könnte Aufschluss darüber geben, ob die Verwendung einer Standardzahl, welche die numerische Mitte des präsentierten Zahlenintervalls bildet, einen kategorialen SNARC-Effekt verursacht. Dazu müssten zwei Standardzahlen zur Anwendung kommen, z. B. 3 und 7. Als Vergleichszahlen würden alle Zahlen aus dem Bereich 1–9 (ohne die Standardzahlen) präsentiert. Die Standardzahlen 3 bzw. 7 sollten aufgrund ihrer Position im verwendeten Intervall eine leichte Assoziation mit ‚links' bzw. ‚rechts' voraktivieren, was einen kontinuierlichen SNARC-Effekt zur Folge haben müsste.

Die zweite Annahme, es gäbe eine natürliche Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' ist äußerst spekulativ. Die Plausibilität dieser Annahme könnte allein durch die räumlich-numerische Assoziation des mentalen Zahlenstrahls begründet werden. Zusätzlich gibt ein Großteil der Versuchspersonen an, die Antwort ‚kleiner' leichter mit der linken im Vergleich zur rechten Antworttaste und die Antwort ‚größer' leichter mit der rechten im Vergleich zur linken Antworttaste verbinden zu können. Um einen ersten Hinweis auf die Gültigkeit dieser Annahme zu erhalten, wurde ein weiteres Kontrollexperiment durchgeführt, dass im Anschluss an diese Diskussion beschrieben wird.

Auf die Plausibilität der Postulierung einer natürlichen Zuordnung von ‚klein' zu ‚links' sowie ‚groß' zu ‚rechts' weisen außerdem Ergebnisse experimenteller Untersuchungen hin, die eine ähnliche Zuordnung für das Konzept Zeit nahelegen. Beispielsweise konnten Tversky, Kugelmass und Winter (1991) zeigen, dass Kindergartenkinder, Erst-, Dritt- und Fünftklässler sowie Erwachsene verschiedene Begriffe zeitlicher Abfolgen wie Mahlzeiten (Frühstück, Mittag, Abendbrot), Tageszeiten (Morgen, Nachmittag, Nacht) oder Aktivitäten (z. B. Schlafanzug anziehen, Zähne putzen, ins Bett gehen) nicht nur in ihrer zeitlichen Reihenfolge sortieren, sondern das zeitliche früheste Ereignis häufiger auf der linken Seite und das zeitlich späteste Ereignis häufiger auf der rechten Seite positionieren.

Ähnliche Ergebnisse sind in dem Experiment von Santiago, Lupiáñez, Pérez und Funes (2007) zu finden. Die Autoren präsentierten ihren Versuchspersonen Verben in der Zeitform Präteritum (z. B. *hablè* = ich sprach) oder Futur I (z. B. *hablarè* = ich werde sprechen) sowie Adverbien, die sich auf die Vergangenheit (*ayer* = gestern) oder die Zukunft (*manãna* = morgen) bezogen. In einer Sitzungshälfte sollten die Verben/Adverbien in der Vergangenheitsform mit einem linken Tastendruck und die Verben/Adverbien in der Zukunftsform mit einem rechten Tastendruck beantwortet werden. In der anderen Hälfte lautete die Instruktion umgekehrt. Die Autoren registrierten schnellere Antworten mit der linken Hand auf Verben und Adverbien in der Vergangenheitsform und schnellere Antworten mit der rechten Hand auf Verben und Adverbien in der Zukunftsform. Daraus kann man ableiten, dass Vergangenes mit ‚links' und Zukünftiges mit ‚rechts' assoziiert zu sein scheint. In einem beinahe identischen Experiment, in welchem die Verben bzw. Adverbien als

Sprechblase über einem Kopf dargestellt wurden, gelang Torralbo, Santiago und Lupiáñez (2006) eine Replikation dieser Ergebnisse.

Weisen die präsentierten Reize zusätzlich eine zeitliche Reihenfolge auf, dann lassen sich obendrein symbolische Distanzeffekte zeigen. In einem Experiment von Santiago, Román, Ouellet, Rodríguez und Pérez-Azor (2010) sahen sich die Versuchspersonen 5-minütige, ihnen unbekannte Werbefilme an. Nach jedem Werbefilm folgten Vergleichsaufgaben, welche dem Prinzip des numerischen Vergleiches einer Standard- mit einer Vergleichszahl folgten. Für diese Aufgaben wurden die Filme in elf gleichgroße Sequenzen unterteilt, aus denen jeweils eine Szene als Standbild ausgewählt wurde. Das sechste dieser elf Standbilder entstammte der Mitte des Filmes und wurde als Standardbild verwendet, die restlichen Standbilder dienten als Vergleichsbilder. In jedem Durchgang wurde der Versuchsperson ein Vergleichsbild präsentiert und sie sollte entscheiden, ob dieses einer Szene vor oder nach der Szene des Standardbildes entsprach. Jede Versuchsperson absolvierte zu jedem Film zwei Blöcke, in denen die Zuordnung der vorher- bzw. nachher-Antwort zur linken bzw. rechten Antworttaste variiert wurde. Einerseits erhielten die Autoren mit abnehmender zeitlicher Distanz zwischen den Szenen der Vergleichsreize und der Szene des Standardreizes einen Anstieg der Reaktionszeiten (symbolischer Distanzeffekt). Andererseits bestand ein Zusammenhang zwischen der Antwortseite, die für die Antwort „früher“ oder “später“ verwendet wurde und der Reaktionszeit. Die Reaktionszeiten für die Standbilder aus den Sequenzen 1–5 („früher“) konnten schneller mit der linken Hand klassifiziert werden, während die Klassifikation der Standbilder aus den Sequenzen 7–11 („später“) schneller mit der rechten Hand gelang. Zwar überprüften die Autoren nicht, ob es sich um einen kontinuierlichen oder kategorialen Zusammenhang handelte, jedoch lässt ein Blick auf die Ergebnisdarstellungen letzteres vermuten. Die Autoren schlussfolgern, dass – ähnlich der räumlich-numerischen Assoziation – ein Zusammenhang zwischen Zeit und Raum besteht. Trotz des symbolischen Distanzeffekts geht aus den Daten jedoch nur hervor, dass ‚früher‘ mit ‚links‘ und ‚später‘ mit ‚rechts‘ assoziiert ist.

Die berichteten Experimente belegen, dass es – ähnlich der postulierten klein-links/groß-rechts-Assoziation – auch eine Assoziation von ‚früh‘ mit ‚links‘ und ‚spät‘ mit ‚rechts‘ zu geben scheint (Santiago et al., 2010; Tversky et al., 1991). Eine ähnliche Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Experiment von Santiago et al. (2007, s. a. Torralbo et al., 2006) für Vergangenes und Zukünftiges. Dies könnte die in dem Modell zur Entstehung des kategorialen SNARC-Effekts erfolgte Abgrenzung eines generellen links-klein/rechts-groß-Vorteils von der räumlich-numerischen Assoziation zusätzlich begründen.

Es stellt sich nun die Frage, wie das Modell mit den Ergebnissen zu negativen Zahlen und der Verwendung zweier Standardzahlen in Einklang zu bringen ist. Allein die Tatsache, dass die Standardzahl -5 bzw. 5 nicht die Mitte des verwendeten Zahlenbereichs $[-9,\dots,9]$ darstellt, könnte das eben formulierte Modell widerlegen. Dementgegen lassen die schnellen Reaktionen auf negative Zahlen bei der Standardzahl 5 sowie der fehlende Einfluss der numerischen Differenz vermuten, dass die Entscheidung weniger durch einen numerischen Vergleich zustande kam, sondern vielmehr anhand des Vorzeichens getroffen wurde. Gleiches gilt für positive Zahlen bei der Standardzahl -5. Das Ausbleiben des numerischen Distanzeffekts zusammen mit den kurzen Reaktionszeiten wurde auch beim numerischen Vergleich zweier gleichzeitig präsentierter Zahlen auf die Klassifikation der Vorzeichen zurückgeführt (Lochmann, 2005). Da die entsprechende Antwort „klein“ oder „groß“ für die Auswahl der Antworttaste dennoch abgerufen werden muss, resultiert aus der natürlichen Zuordnung klein-links und groß-rechts der Reaktionszeitvorteil für die rechte Hand bei positiven Zahlen bei der Standardzahl -5 und für die linke Hand bei negativen Zahlen bei der Standardzahl 5. Deshalb findet der numerische Vergleich nur für die Vergleichszahlen $[-9,\ldots,-6,-4,\ldots,-1]$ mit der Standardzahl -5 und $[1,\ldots,4,6,\ldots,9]$ mit der Standardzahl 5 statt.

Für den kategorialen SNARC-Effekt beim numerischen Vergleich negativer Zahlen mit der Standardzahl -5 lautet das Argument ähnlich. Die Zuordnung von numerisch klein und numerisch groß wird allein durch die Instruktion vorgegeben. Bei der Standardzahl -5 muss den Zahlen -9 bis -6 für die Auswahl der richtigen Antworttaste das Attribut „kleiner" zugeordnet werden, welches aufgrund der Assoziation von ‚klein' mit ‚links' zu schnelleren Reaktionen mit der linken Antwortseite führt. Für die Zahlen -4 bis -1 gilt hingegen, dass diese numerisch größer als die Standardzahl sind, weshalb ihnen das Attribut „größer" zugeordnet werden muss. Aufgrund des größer-rechts-Vorteils erfolgt die Reaktion auf diese Zahlen schneller mit der rechten Hand. Die mentale Größenrepräsentation, auf die zugegriffen wird, um die Antwort „numerisch größer" oder „numerisch kleiner" abzurufen, kann anhand dieses Ergebnisses nicht spezifiziert werden. Sowohl mit als auch ohne Annahme eines negativen mentalen Zahlenstrahls stellt die Standardzahl (-5 oder $|-5|$) die numerische Mitte des Zahlenintervalls dar und hemmt die räumlich-numerische Assoziation der Vergleichszahl. Erst wenn die Standardzahl nicht mehr die numerische Mitte bildet, könnte auch mit dem SNARC-Effekt ein Beitrag zur Unterscheidung der beiden konkurrierenden Annahmen getroffen werden. Die erhöhten Reaktionszeiten auf negative Zahlen beim Standard -5 (607 ms) im Vergleich zu positiven Zahlen beim Standard 5 (515 ms) könnten allerdings einen Hinweis darauf liefern, dass auch beim numerischen Vergleich negativer Zahlen mit der Standardzahl -5 die absolute numerische Größe beurteilt wurde. So könnte die Versuchsperson beurteilen, ob der Absolutbetrag der Vergleichszahl größer oder kleiner als der Absolutbetrag der Standardzahl ist. Das Urteil bzgl. der Absolutbeträge müsste in einem zweiten Schritt auf die Antwortmöglichkeiten „numerisch größer" oder „numerisch kleiner" übertragen werden. Dies würde einen weiteren Verarbeitungsschritt – Umkehr des kleiner/größer Status – erfordern und hätte verlangsamte Reaktionen zur Folge. Allerdings könnte auch die Zahlenstrahlannahme die unterschiedlichen Reaktionszeiten beim Standard -5 und 5 erklären. Dazu müsste man annehmen, dass der seltene Umgang mit negativen Zahlen dazu führt, dass der Zugriff auf die mentale Größenrepräsentation der negativen Zahlen erschwert ist.

Das vorgeschlagene Modell ist in der Lage, den kategorialen SNARC-Effekt zu erklären. Die Ergebnisse der Uhrzeiten-Aufgabe von Baechtold et al. (1998) sind mit dem Modell jedoch unvereinbar. Diese Autoren wiesen mit dem Vergleich von Längen (länger oder kürzer als 6 cm) den gewohnten SNARC-Effekt nach. Mit dem Vergleich von Uhrzeiten (früher oder später als 6.00 Uhr) ergab sich jedoch ein umgekehrter SNARC-Effekt: Auf Zahlen, die Uhrzeiten früher als 6.00 Uhr entsprachen, wurde schneller mit der rechten Hand und auf Zahlen, die Uhrzeiten später als 6.00 Uhr entsprachen, wurde schneller mit der linken Hand reagiert. Beide Aufgaben könnten mit einer numerischen Vergleichsaufgabe mit der Standardzahl 6 gleichgesetzt werden. Allerdings merken Proctor und Cho (2006) dazu an, dass der umgekehrte SNARC-Effekt in der Uhren-Gruppe entstehe, da sich Versuchspersonen während der Bearbeitung der Aufgabe das Bild einer Analoguhr vorstellten. Diese Strategie des *mental imagery* könnte aufgrund der Durchführung der Übungsdurchgänge induziert worden sein. In diesen wurde der Lineal-Gruppe das Bild eines Lineals und der Uhren-Gruppe das Bild eine Analoguhr zur Veranschaulichung der Aufgabe vorgelegt. Unter Berücksichtigung symbolischer Distanzeffekte in Aufgaben zum *mental imagery* erscheint diese Erklärung plausibel. Je weiter beispielsweise zwei Objekte auf einer kognitiven Landkarte auseinander liegen, desto schneller erfolgt die Reaktion (Denis & Zimmer, 1992; Kosslyn, Ball & Reiser, 1978; Maki, Maki & Marsh, 1977; Noordzij & Postma, 2005). In einem Experiment von Tlauka und McKenna (1998) konnte zudem ein SNARC-ähnlicher Effekt belegt werden. Auf Objekte, die im mentalen Bild auf der linken bzw. rechten Seite lokalisiert waren, konnte auch schneller mit der linken bzw. rechten Antwortseite reagiert werden.

Experimente zum visuell-räumlichen Gedächtnis deuten darauf hin, dass der SNARC-Effekt beim numerischen Vergleich mit einer Standardzahl und Paritätsurteilen nicht auf den gleichen Prozessen beruht. In vielen Untersuchungen zu den beiden Subsystemen des Arbeitsgedächtnismodells nach Baddeley und Hitch (1974), dem visuell-räumlichen Notizblock und der phonologischen Schleife, konnte gezeigt werden, dass Aufgaben zum *mental imagery* durch Zweitaufgaben mit räumlichen, nicht aber sprachlichen Komponenten gestört werden können. Umgekehrt interferierten Aufgaben mit einem hohen sprachlichen Anteil mit gleichzeitig ausgeführten verbalen, nicht aber räumlichen Zweitaufgaben (z. B. Baddeley & Lieberman, 1980; Farmer, Berman & Fletcher, 1986; Gyselinck, De Beni, Pazzaglia, Meneghetti & Mondoloni, 2007). Die Logik dieser Experimente lautet, dass die Zweitaufgabe mit der Erstaufgabe interferiert, wenn beide Aufgaben gemeinsame kognitive Ressourcen beanspruchen.

In einer aktuellen Untersuchung gingen Herrera, Macizo und Semenza (2008) der Frage nach, ob der SNARC-Effekt mit einer parallel zum numerischen Vergleich mit Standard 5 ausgeführten räumlichen Zweitaufgabe beeinflusst werden kann. Dazu wählten sie Zweitaufgaben aus, die entweder die phonologische Schleife (phonologische Bedingung) oder den visuell-räumlichen Notizblock (räumliche Bedingung) maximal beanspruchten. In der phonologischen Bedingung wurden Konsonant-Vokal-Konsonant-Trigramme vor einem Block mit numerischen Vergleichsaufgaben mit Standard 5 präsentiert, die sich die Versuchsperson merken sollte. Nach Absolvierung von 18 Vergleichsdurchgängen mussten die KVK-Folgen wiedergegeben werden. In der räumlichen Bedingung kam die *Corsi-Block-Tapping*-Aufgabe (Berch, Krikorian & Huha, 1998) zur Anwendung. In dieser Aufgabe werden auf dem Bildschirm zunächst max. 9 weiße Quadrate an zufälligen Positionen präsentiert. Im Anschluss verändern nacheinander 2–9 der Quadrate ihre Farbe. Diese Reihenfolge der sich farblich veränderten Quadrate soll in der Testphase wiedergegeben werden. Die Schwierigkeit der Zweitaufgabe wurde individuell an die vorher erfasste phonologische bzw. visuell-räumliche Gedächtnisspanne mittels Anzahl der KVK-Folgen bzw. Anzahl der Quadrate angepasst. In einer Kontrollbedingung wurde der numerische Vergleich ohne Zweitaufgabe ausgeführt. Die Variation der Zweitaufgabenbedingung wirkte sich auf den SNARC-Effekt, nicht aber auf den numerischen Distanzeffekt aus. Während der SNARC-Effekt in der Kontroll- und der phonologischen Bedingung in der gewohnten Weise auftrat, verschwand er in der räumlichen Bedingung vollständig. Ein zweites Experiment, in dem das Behaltensintervall in den beiden Bedingungen mit Zweitaufgabe konstant gehalten wurde, änderte nichts am Ergebnismuster. Die Autoren gehen davon aus, dass die räumlichen Merkmale der numerischen Größen, die für den SNARC-Effekt verantwortlich sind, temporär im visuell-räumlichen Notizblock repräsentiert werden. Da dieser jedoch während der räumlichen Zweitaufgabe blockiert war, konnte die räumlich-numerische Assoziation nicht aktiviert werden, was zum Verschwinden des SNARC-Effekts führte.

Dijck, Gevers und Fias (2009) berichteten in ihrem kürzlich veröffentlichten Artikel eine vollständige Replikation der Ergebnisse von Herrera et al. (2008) zum SNARC-Effekt beim numerischen Vergleich mit Standard 5. In einem weiteren Experiment boten sie anstelle der numerischen Vergleichsaufgabe eine Aufgabe zum gerade/ungerade-Status dar. Die restliche Versuchsanordnung stimmte – mit unerheblichen Abweichungen – mit der eben beschriebenen von Herrera et al. überein. Interessanterweise trat der SNARC-Effekt nun in der Kontrollbedingung und der räumlichen Bedingung in vergleichbarer Weise auf, wohingegen er in der phonologischen Bedingung verschwand. Diese Ergebnisse liefern einen Hinweis darauf, dass der SNARC-Effekt beim numerischen Vergleich und der Paritätsaufgabe durch unterschiedliche Prozesse zustande kommt. Würde der SNARC-Effekt, wie bisher angenommen, in beiden Aufgaben die räumlich-numerische Assoziation als Eigenschaft eines mentalen Zahlenstrahls abbilden, so sollte sich eine räumliche Zweitaufgabe auch in beiden Aufgaben entsprechend ähnlich auswirken. Zwar nimmt das eben formulierte Modell an, dass unterschiedliche Prozesse die beiden Formen des SNARC-Effekts verursachen, allerdings müssten die Ergebnisse umgekehrt lauten. Die räumlich-numerische Assoziation, die den kontinuierlichen SNARC-Effekt in Paritätsaufgaben verursacht, müsste durch eine räumliche Zweitaufgabe beeinflusst werden. Eine Aufgabe mit verbaler Komponente sollte sich auf die natürliche Zuordnung links-klein bzw. rechts-groß, die als Ursache für den kategorialen SNARC-Effekt in der numerischen Vergleichsaufgabe mit Standard 5 angesehen wird, auswirken.

Einige Aspekte der Experimente von Herrera et al. (2008) und Dijck et al. (2009) stimmen jedoch nicht mit den restlichen Befunden aus diesem Forschungsgebiet überein. Erstens lassen die Gesamtreaktionszeiten in den Blöcken mit und ohne Zweitaufgabe starke Zweifel an der experimentellen Methode aufkommen. So wurden im ersten Experiment von Herrera et al. in der räumlichen Bedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung oder phonologischen Bedingung die kürzesten Reaktionszeiten produziert. Die Gesamtreaktionszeiten der Kontroll- im Vergleich zur räumlichen Bedingung unterschieden sich nicht mehr, nachdem das Behaltensintervall der beiden Zweitaufgabenbedingungen konstant gehalten wurde. Dennoch muss man die Frage stellen, weshalb eine parallel zur Erstaufgabe ausgeübte Zweitaufgabe kürzere bzw. vergleichbare Reaktionszeiten im Vergleich zu einer Kontrollbedingung zur Folge hat. Im Gegensatz dazu werden in den meisten Untersuchungen Anstiege der Reaktionszeiten, Lösungszeiten oder Fehlerraten bzw. eine Abnahme der korrekten Antworten berichtet, wenn parallel zu einer räumlichen Primäraufgabe eine räumliche Zweitaufgabe bearbeitet werden muss (z. B. Baddeley & Lieberman, 1980; Bruyer & Scailquin, 1998). Des Weiteren wird in diesen Untersuchungen die Zweitaufgabe tatsächlich parallel zur Erstaufgabe ausgeführt. Beispielsweise bestand die räumliche Aufgabe im Experiment von Baddeley und Lieberman (1980) darin, mit einer Taschenlampe ein sich bewegendes Pendel zu verfolgen. An dem Pendel war eine Photozelle befestigt, die einen Ton auslöste, wenn der Lichtstrahl der Taschenlampe darauf traf. Zur Beeinflussung der phonologischen Schleife wird meist auf die sog. artikulatorische Unterdrückung zurückgegriffen. Dazu werden die Versuchspersonen aufgefordert, parallel zur Primäraufgabe, sinnlose Silben oder kurze Wörter (z. B. „the“) zu wiederholen (z. B. Baddeley, Chincotta & Adlam, 2001; Miyake, Emerson, Padilla & Ahn, 2004). Die korrekte Ausführung dieser Zweitaufgaben wird i. d. R. vom Versuchsleiter kontrolliert. In den Experimenten von Herrera et al. gerät die Wirkung der räumlichen Zweitaufgabe jedoch stark in Zweifel, da in beiden Experimenten extrem hohe relative Fehlerhäufigkeiten (.78 in Experiment 1 und .76 in Experiment 2) berichtet werden. Im Experiment von Dijck et al. werden für die räumliche Zweitaufgabe zwar niedrigere Fehlerraten angegeben (Paritätsaufgabe: .24, numerische Vergleichsaufgabe: .20), diese sind jedoch keineswegs zufriedenstellend. Es gilt zu klären, ob die verwendeten Zweitaufgaben die Performanz in der Primäraufgabe – gemessen am SNARC-Effekt – beeinflussten. Umgekehrt könnte der numerische Vergleich bzw. die Paritätsaufgabe die Leistung in der Gedächtnisaufgabe massiv beeinträchtigt haben, was mit den hohen Fehlerraten und den geringen Unterschieden in den Gesamtreaktionszeiten vereinbar wäre. Viertens stellt die *Corsi-Block*-Aufgabe zur Untersuchung der Interferenz durch Zweitaufgaben stets die Primäraufgabe dar (Berch et al., 1998). Jones, Farrand, Stuart und Morris (1995) zeigten zudem, dass das Wiederholen einer nicht-verbalen Sequenz sowohl durch verbale als auch durch räumliche Zweitaufgaben gestört wird, was sich im Übrigen in einer Abnahme der korrekt erinnerten Itemfolgen äußerte. Zukünftige Untersuchungen müssen diesen Problemen begegnen und können so einen Beitrag zur Unterscheidung der unterschiedlichen Assoziationen liefern, die zur kontinuierlichen oder kategorialen Form des SNARC-Effekts führen.

Es gilt festzuhalten, dass das vorgeschlagene Modell eine gute Erklärung für den kategorialen SNARC-Effekt liefert. Neben der räumlich-numerischen Assoziation wurde zusätzlich eine natürliche Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' postuliert. Für die kategoriale Form des SNARC-Effekts wird allein diese natürliche Assoziation verantwortlich gemacht. Aus diesem Grund ist eine Aussage über die zugrunde liegende mentale Größenrepräsentation der negativen Zahlen einerseits nicht möglich. Andererseits ist die Annahme der Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls für das Entstehen des kategorialen SNARC-Effekts nicht notwendig.

4.4 Experiment 4: Kontrollexperiment zum klein-links/groß-rechts-Vorteil

4.4.1 Fragestellung

In dem in Abschnitt 4.3.4 vorgeschlagenen Modell wurde postuliert, dass eine natürliche Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' existiert, wodurch eine kompatible (links-klein und rechts-groß) und eine inkompatible Tastenzuordnung (links-groß und rechts-klein) entsteht. Das Zusammenwirken dieser natürlichen Zuordnung mit der räumlichen Assoziation wurde als Ursache des kategorialen SNARC-Effekts angeführt. Mit dem nachfolgend beschriebenen Kontrollexperiment soll ein erster Versuch unternommen werden, diese natürliche Assoziation experimentell nachzuweisen. In jedem Durchgang wird entweder das Wort „klein" oder das Wort „groß" dargeboten, variiert wird die Antwortseite. Ein Reaktionszeitvorteil der kleiner-links/größer-rechts-Zuordnung gegenüber der kleiner-rechts/größer-links-Zuordnung mit dieser überaus einfachen Versuchsanordnung könnte einen ersten Hinweis auf die Gültigkeit eines natürlichen kleiner-links/größer-rechts-Vorteils liefern.

4.4.2 Methode

Versuchspersonen An diesem Kontrollexperiment nahmen acht neue Versuchspersonen teil, deren mittleres Alter 22 Jahre betrug ($SD = 3$ Jahre). Für die Teilnahme konnte eine halbe Versuchspersonenstunde gutgeschrieben werden. Alle Versuchspersonen waren Rechtshänder.

Stimuli Das Reizmaterial bestand aus den zwei Wörtern „klein" bzw. „groß". Diese wurden in schwarzer Schrift auf weißem Grund dargestellt. Die Fläche, in der das Wort „klein" dargeboten wurde, hatte bei einem Betrachtungsabstand von 65 cm einen Sehwinkel von $2.2° \times 0.8°$. Das Wort „groß" umschließende Rechteck hatte eine Größe von 2.7×1.3 cm, was einem Sehwinkel von $2.4° \times 1.1°$ entsprach. Die Folge der Wörter in einem Block wurde so programmiert, dass keines der beiden Wörter häufiger als dreimal nacheinander erschien.

Versuchsdurchführung In jedem von insgesamt zehn Blöcken wurden die beiden Wörter jeweils 15-mal in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Zusammen mit den drei *warm-up trials* ergeben sich pro Block 33 Durchgänge. Die Zuordnung der Antwortseite zu den Wörtern wechselte von Block zu Block. Vor jedem Block wurde die geforderte Tastenzuordnung noch einmal auf dem Bildschirm angezeigt. Die Hälfte der Versuchspersonen sollte im ersten Block die linke Taste bei Präsentation des Wortes „klein" und die rechte Taste bei Präsentation des Wortes „groß" bedienen. Die andere Hälfte begann mit der umgekehrten Zuordnung der Antwortseite zu den Wörtern (klein-rechts und groß-links). Insgesamt wurde jede der vier Bedingungen 75-mal repliziert.

Zu Beginn eines Durchgangs wurde für 500 ms ein Hinweisreiz in Form eines Rechtecks angezeigt. Nach weiteren 400 ms erschien in der Bildschirmmitte das Wort, welches bis zur Antwortabgabe sichtbar war. Nach einem variablen ITI von 1000–1500 ms begann der nächste Durchgang.

Versuchsplan Es wurden die zwei unabhängigen Variablen Antwortseite (links vs. rechts) und Wort (klein vs. groß) realisiert. Es handelt sich um ein vollständiges *within subjects* Design. Erfasst wurden Reaktionszeit und Fehlerrate.

Geräte Zur Reizdarbietung und Reaktionszeiterfassung wurde ein handelsüblicher PC (Pentium 3 GHz, Sony 17" Bildschirm, 100 Hz Bildwiederholfrequenz) verwendet. An diesen war ein Reaktionstaster zur Erfassung der Reaktionszeit angeschlossen. Das Experiment wurde unter Windows mit der Entwicklungsumgebung Code::Blocks (Version 8.0.2) und der ***S**imple and **F**ast **M**ultimedia **L**ibrary* programmiert.

4.4.3 Ergebnisse

4.4.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

Erneut gelten die ersten drei Durchgänge eines jeden Blocks als *warm-ups* und gehen nicht in die weitere Datenanalyse ein. Im Verlauf der zehn Blöcke gab es kaum Lerneffekte: Die Versuchspersonen produzierten im ersten Block eine mittlere Reaktionszeit von 333 ms und im letzten Block eine mittlere Reaktionszeit von 338 ms. Dieser geringe Reaktionszeitunterschied kann sicherlich auf die Einfachheit des Experimentes zurückgeführt werden, weshalb die Berechnung der *trimmed means* auf den 75 Replikationen jeder Bedingung beruht.

Die mittlere Fehlerrate in diesem Experiment betrug 0.051. Die Berechnung der Korrelation zwischen den relativen Fehlerhäufigkeiten und den mittleren Reaktionszeiten erscheint nicht sinnvoll, da in diese Berechnung nur vier Werte für die vier Bedingungen (klein-links, klein-rechts, groß-links und groß-rechts) eingehen würden. Aus Abbildung 4.14 geht hervor, dass es in den Daten keinen *speed-accuracy tradeoff* gibt: Längere Reaktionszeiten gehen mit größeren relativen Fehlerhäufigkeiten einher.

4.4.3.2 Der Vorteil der klein-links/groß-rechts-Zuordnung

Abbildung 4.14 ist zu entnehmen, dass die Reaktionen dann am schnellsten erfolgen, wenn mit einem linken Tastendruck auf das Wort „klein“ und mit einem rechten Tastendruck auf das Wort „groß“ reagiert wird. Zur Überprüfung dieses Zusammenhangs wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den beiden Faktoren Wort (klein vs. groß) und Antwortseite (links vs. rechts) gerechnet. Der Haupteffekt Wort verfehlt mit $F_{1,7} = 3.849$ ($p = .091$) knapp das Signifikanzniveau. Demgegenüber wird der Haupteffekt Antwortseite mit $F_{1,7} = 8.965$ ($p = .02$) signifikant. Die Versuchspersonen können 15 ms schneller mit der rechten im Vergleich zur linken Hand reagieren, was sicherlich auf die Rechtshändigkeit zurückzuführen ist. Entscheidend für die Fragestellung ist jedoch die Signifikanz der Interaktion Wort × Antwortseite ($F_{1,7} = 5.108$, $p = .05$). Auf das Wort „klein“ kann 25 ms schneller reagiert werden, wenn zur Antwortabgabe die linke im Vergleich zur rechten Hand genutzt wird. Demgegenüber können die Antworten auf das Wort „groß“ am schnellsten mit der rechten Hand abgegeben werden. Der Reaktionszeitvorteil beträgt in diesem Fall sogar 54 ms.

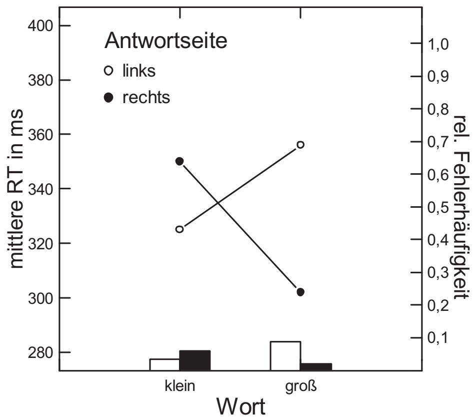


Abbildung 4.14. Mittlere Reaktionszeiten und Fehlerraten in Abhängigkeit von der Antwortseite getrennt für die Wörter „klein“ und „groß“.

4.4.4 Diskussion

Das Kontrollexperiment wurde durchgeführt, um einen ersten Hinweis darauf zu erhalten, ob es eine Assoziation des Wortes „klein“ mit ‚links‘ und des Wortes „groß“ mit ‚rechts‘ gibt, wie im Modell zur Entstehung des kategorialen SNARC-Effekts (siehe Abschnitt 4.3.4) angenommen. Dies konnte an einer Stichprobe von acht Versuchspersonen bestätigt werden. Wurde das Wort „klein“ präsentiert, dann wurde 25 ms schneller mit der linken im Vergleich zur rechten Hand reagiert. Mit einem Reaktionszeitvorteil von 54 ms für Reaktionen mit der rechten im Vergleich zur linken Antwortseite ergab sich für das Wort „groß“ ein noch größerer Effekt. Unter Berücksichtigung der Anzahl der Reize (2) und der Anzahl der Replikationen pro Bedingung (75) ist die Annahme einer natürlichen Assoziation von ‚klein‘ mit ‚links‘ und ‚groß‘ mit ‚rechts‘ durchaus gerechtfertigt.

Die Kürze und Einfachheit des Experiments bringt jedoch auch einige Kritikpunkte mit sich. Erstens ist festzuhalten, dass die Hypothese des Experiments durch den Wechsel zwischen der kompatiblen und inkompatiblen Instruktion für die Versuchsperson sehr leicht abzuleiten war. Dies könnte ein hypothesenkonformes Verhalten induziert haben. Zweitens wird die Verallgemeinerung des Ergebnisses durch die Verwendung von nur zwei Reizen eingeschränkt, wenngleich der kleiner-links/größer-rechts-Vorteil mit einem einfachen Versuchsplan belegt werden konnte. In zukünftigen Untersuchungen sollte deshalb mehr als ein Reizpaar verwendet werden. So könnten beispielsweise geometrische Formen in unterschiedlichen Größen (▵ vs. △) oder weitere Wortpaare („winzig“ vs. „riesig“) in das Material aufgenommen werden. Es wäre zu erwarten, dass sich aus den Reaktionszeiten eine Assoziation kleiner geometrischer Figuren sowie des Wortes „winzig“ mit ‚links‘ und großer geometrischer Figuren sowie des Wortes „riesig“ mit ‚rechts‘ schließen lässt. Drittens könnte mit der Verwendung neutraler Reizpaare (Stuhl – Tisch) gezeigt werden, dass der durch die jeweilige Antwortseite bedingte Reaktionszeitvorteil tatsächlich auf die Assoziation von ‚klein‘ mit ‚links‘ und ‚groß‘ mit ‚rechts‘ zurückzuführen ist.

Mit dem Kontrollexperiment ließ sich ein Hinweis auf den kleiner-links/größer-rechts-Vorteil feststellen. Eine ausgiebigere empirische Prüfung ist dennoch erstrebenswert.

4.5 Experiment 5: Der Größenkongruenzeffekt

4.5.1 Fragestellung

Die Entstehung des kategorialen SNARC-Effekts aufgrund des in Abschnitt 4.3.4 postulierten kleiner-links/größer-rechts-Vorteils ermöglichte keine Entscheidung zugunsten der Zahlenstrahl- oder Strategieannahme. Somit eignet sich der SNARC-Effekt nicht zur Beantwortung der zentralen Fragestellung.

Mit dem Größenkongruenzeffekt (vgl. Abschnitt 2.2.4.1) ist eine Möglichkeit gegeben, für den numerischen Vergleich zweier negativer Zahlen zu entscheiden, ob dieser auf den positiven mentalen Größenrepräsentationen beruht und zur korrekten Auswahl Strategien zum Einsatz kommen müssen (Strategieannahme) oder ob negativen Zahlen eigenständige mentale Größenrepräsentationen zugrunde liegen (Zahlenstrahlannahme). Der Größenkongruenzeffekt ist deshalb für die Fragestellung geeignet, da sich für die beiden konkurrierenden Annahmen entgegengesetzte Vorhersagen ergeben. Zur Ermittlung des Größenkongruenzeffekts beurteilen Versuchspersonen Zahlenpaare, deren Ziffern in unterschiedlichen physikalischen Größen dargestellt werden. Bei Übereinstimmung der numerischen und physikalischen Größe entsteht Erleichterung: Beim kongruenten Zahlenpaar 6 4 ist die Zahl 6 sowohl numerisch als auch physikalisch größer als die Zahl 4. Hingegen handelt es sich beim Zahlenpaar 6 4 um ein inkongruentes Zahlenpaar, da mit einer numerisch großen Zahl eine physikalisch kleine (Schrift-)Größe einhergeht. Dies führt zu einer Interferenz zwischen der physikalischen und der numerischen Größe einer Zahl. Der Größenkongruenzeffekt nach Henik und Tzelgov (1982) liegt dann vor, wenn auf kongruente Zahlenpaare schneller geantwortet werden kann als auf inkongruente Zahlenpaare. Tabelle 4.15 veranschaulicht, welche Kongruenzbeziehungen sich zwischen der numerischen und physikalischen Größe – unter Annahme eines negativen mentalen Zahlenstrahls – für negative und positive Zahlenpaare ergeben.

Tabelle 4.15

Darstellung der Kongruenzbeziehungen am Beispiel zweier Zahlenpaare

Zahlenpaar		Kongruenzbeziehung
−3	−5	inkongruent
−3	−5	kongruent
3	5	kongruent
3	5	inkongruent

Bei Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls lehnen sich die Vorhersagen für negative Zahlenpaare an die Ergebnisse aus dem positiven Zahlenbereich an. Reaktionen auf kongruente Zahlenpaare (z. B. −3−5) sollten schneller erfolgen als Reaktionen auf inkongruente Zahlenpaare (z. B. −3−5). Im Falle eines kongruenten Zahlenpaares führt die Übereinstimmung zwischen numerischer und physikalischer Größe zu Erleichterung, wohingegen ein inkongruentes Zahlenpaar Interferenz verursacht.

Demgegenüber wird für die beiden vorgeschlagenen Strategien ein Reaktionszeitvorteil zugunsten der inkongruenten Zahlenpaare vorhergesagt. Die Versuchsperson wird aufgefordert, bei jedem präsentierten Zahlenpaar die numerisch größere der beiden Zahlen per Tastendruck auszuwählen.

Wendet die Versuchsperson die Strategie der Instruktionsumkehr an, so wählt sie zur korrekten Ausführung der Aufgabe die absolut kleinere Zahl aus. Demzufolge sollte genau dann Erleichterung auftreten, wenn die absolut kleinere Zahl – und damit die numerisch größere – gleichzeitig die physikalisch kleinere Zahl ist. Somit muss anstelle der numerischen die absolute numerische Größe mit der physikalischen Größe einhergehen. Dies trifft auf alle inkongruenten negativen Zahlenpaare zu (Zahlenpaar −3 −5 in Tabelle 4.15). Demzufolge werden mit der Annahme der Instruktionsumkehr kürzere Reaktionszeiten auf inkongruente im Vergleich zu kongruenten Zahlenpaaren vorhergesagt. Da das Urteil bei Anwendung der Strategie der Reaktionsumkehr ebenfalls auf der absoluten numerischen Größe beruht, lauten die Vorhersagen entsprechend. Zur Auswahl der numerisch größeren Zahl eines negativen Zahlenpaares wird in einem ersten Schritt die absolut größere Zahl bestimmt und dann in einem zweiten Schritt die andere Taste bedient. Somit werden auch mit der Annahme der Reaktionsumkehr schnellere Reaktionen auf inkongruente im Vergleich zu kongruenten Zahlenpaaren vorhergesagt.

Beide Strategieannahmen führen zu der Vorhersage, dass auf inkongruente im Vergleich zu kongruenten Zahlenpaaren schneller geantwortet werden kann. Dieses Experiment kann demnach nicht dazu dienen, zwischen den beiden Strategieannahmen zu unterscheiden. Allerdings kann mit den Ergebnissen dieses Experiments eine Entscheidung zwischen der Strategieannahme und der Zahlenstrahlannahme getroffen werden.

4.5.2 Methode

Versuchspersonen Für das Experiment konnten fünf Männer und sieben Frauen des Instituts für Psychologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg rekrutiert werden. Keine der Versuchspersonen hatte bis zu diesem Zeitpunkt an einem Experiment zum numerischen Vergleich teilgenommen. Das durchschnittliche Alter betrug 27 Jahre (Range: 20–30 Jahre). Als Gegenleistung wurden elf Versuchspersonenstunden gutgeschrieben.

Aufgabe Pro Durchgang wurde den Versuchspersonen ein Zahlenpaar präsentiert. Es sollte jeweils per Tastendruck beurteilt werden, welche der beiden Zahlen die numerische größere ist.

Stimuli Verwendet wurden alle Zahlenpaare mit linken und rechten Zahlen im Bereich $[-9, \ldots, -1, 1, \ldots, 9]$, wobei kein Zahlenpaar zwei gleiche absolute Zahlen (z. B. −9 −9 oder 5 −5) enthielt. Es wurden positive, negative und gemischte Zahlenpaare unterschieden. Positive Zahlenpaare enthielten zwei positive Zahlen, negative Zahlenpaare zwei negative Zahlen. Gemischte Zahlenpaare bestanden aus einer negativen und einer positiven Zahl (z. B. −4 8, 9 −6). Die Zahlen wurden als schwarze Ziffern auf weißem Grund dargestellt. Da negative Zahlen durch ein Vorzeichen gekennzeichnet sind, wurde positiven Zahlen ein Pluszeichen vorangestellt.

Zur Realisierung der Kongruenzbedingungen (kongruent, neutral, inkongruent) erfolgte die Ziffendarstellung in drei unterschiedlichen physikalischen Größen – klein, mittel und groß. Dazu wurden drei Schriftgrößen verwendet: 1.1 (horizontal) × 1.1 cm (vertikal), 1.5 × 1.3 cm und 1.7 × 1.5 cm, was einer Sehwinkelgröße von 1.0° (horizontal) × 1.0° (vertikal), 1.3° × 1.1° und 1.5° × 1.3° für kleine, mittlere und große Zahlen entspricht. In der neutralen Bedingung wurden beide Zahlen in der mittleren physikalischen Größe dargeboten. Für die Darstellung kongruenter bzw. inkongruenter Zahlenpaare wurde ausschließlich die kleine und große physikalische Größe verwendet. Der Kodierung der Kongruenzbedingung wurde innerhalb der negativen Zahlenpaare die Zahlenstrahlannahme zugrunde gelegt. Im negativen Zahlenbereich wurde ein Zahlenpaar folglich als kongruent bezeichnet, wenn die numerisch größere Zahl gleichzeitig der physikalisch größeren Zahl entsprach (z. B. −9 −4).

Versuchsdurchführung Jede Versuchsperson nahm an insgesamt elf ca. 50-minütigen Sitzungen teil. Die Aufgabe blieb über die Sitzungen hinweg die gleiche, nämlich die numerisch größere Zahl per Tastendruck auszuwählen. Eine Sitzung bestand aus zwölf Blöcken, in welchen jeweils 3 + 72 Zahlenpaare präsentiert wurden. Die ersten drei Durchgänge eines jeden Blocks dienten als *warm-up trials*. In jeder Sitzung wurde jede Zahlenpaarkombination in jeder Kongruenzbedingung genau einmal dargeboten. Das Experiment wurde so programmiert, dass zwei aufeinander folgende Zahlenpaare keine zwei absolut gleichen Zahlen beinhalteten.

Zu Beginn eines Durchgangs erschien auf dem Bildschirm für 400 ms ein Rechteck der Größe 4.5 × 1.7 cm (entspricht 4.0° × 1.7° Sehwinkel), welches als Hinweisreiz diente. Nach weiteren 400 ms erfolgte die Präsentation des Zahlenpaares, welches bis zur Antwortabgabe sichtbar war. Das variable ITI lag im Bereich 1000–1500 ms. Zwischen den Blöcken gab es eine Pause von mindestens 30 s. Die Versuchspersonen wurden explizit darauf hingewiesen, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu antworten.

Versuchsplan In dem Experiment dienten die numerischen Größen der linken und rechten Zahl des Zahlenpaares als unabhängige Variablen. Beide konnten Werte von $[-9, \ldots, -1, 1, \ldots, 9]$ annehmen. Des Weiteren wurde die Kongruenz als dreistufige unabhängige Variable (kongruent, neutral, inkongruent) realisiert. Auf diese Weise erhält man 288 × 3 (Zahlenpaare × Kongruenzbedingungen) = 864 mögliche Bedingungen. Es handelt sich um ein vollständiges Messwiederholungsdesign. Als abhängige Variablen wurden die Reaktionszeit sowie die Fehlerrate erfasst.

Geräte Die verwendete Apparatur entspricht vollständig der aus den Experimenten 1–3.

4.5.3 Ergebnisse

4.5.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

Von den elf Sitzungen jeder Versuchsperson wurde die erste Sitzung als Übungssitzung definiert und in der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt. Weiterhin dienten in jedem Block die ersten drei Durchgänge als Übungsdurchgänge und gehen nicht in die Auswertung ein. Die Gesamtfehlerrate in diesem Experiment betrug 3.4 %, d. h. von den 124 416 Durchgängen waren lediglich 4 235 fehlerhaft, davon 1 705 (1.4 %) bei den positiven Zahlenpaaren, 1 741 (1.4 %) bei den negativen Zahlenpaaren und 789 (0.6 %) bei den gemischten Zahlenpaaren.

Das hauptsächliche Ziel des vorliegenden Experiments bestand in der Betrachtung der Reaktionszeiten pro Zahlenpaar und Kongruenzbedingung über alle Sitzungen hinweg. In jeder der zehn Sitzungen wurde jedes der 288 Zahlenpaare in jeder der drei Bedingungen (kongruent, neutral, inkongruent) genau einmal repliziert. Auf Grundlage von zehn Replikationen pro Bedingung konnten *trimmed means* mit einem symmetrischen *trimming* von 20 % berechnet werden.

Zur Beurteilung eines *speed-accuracy tradeoff* wurde die Korrelation zwischen den mittleren Reaktionszeiten und den relativen Fehlerhäufigkeiten pro Zahlenpaarart (negativ, positiv, gemischt), jedoch über die drei Kongruenzbedingungen gemittelt, betrachtet. Die Korrelationen betrugen r = .824 (p < .0005), r = .918 (p < .0005) und r = .596 (p < .0005) für die gemischten, negativen und positiven Zahlenpaare. Aufgrund dieser signifikant positiven Korrelationen kann davon ausgegangen werden, dass kein *speed-accuracy tradeoff* vorliegt.

4.5.3.2 Der Größenkongruenzeffekt

In Abbildung 4.15 sind die mittleren Reaktionszeiten der drei Kongruenzbedingungen getrennt für die positiven, negativen und gemischten Zahlenpaare dargestellt.

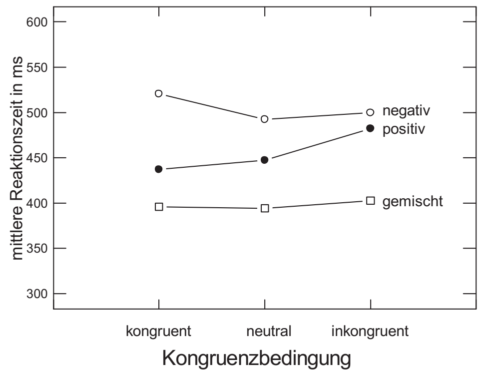


Abbildung 4.15. Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Kongruenzbedingung getrennt für positive, negative und gemischte Zahlenpaare.

Hinsichtlich der gemischten Zahlenpaare verdeutlicht Abbildung 4.15 zwei Merkmale. Auf gemischte Zahlenpaare (397 ms) kann im Vergleich zu positiven (455 ms) bzw. negativen Zahlenpaaren (504 ms) deutlich schneller geantwortet werden. Weiterhin wird aus dieser Abbildung ersichtlich, dass der Kongruenzeffekt innerhalb der gemischten Zahlenpaare mit 6 ms vernachlässigbar gering ist (kongruent: 396 ms, neutral: 394 ms, inkongruent: 402 ms). Aufgrund dieses Ergebnisses wird die Auswertung der gemischten Zahlenpaare in einem gesonderten Abschnitt fortgesetzt.

Der aus Abbildung 4.15 hervorgehende Einfluss der Kongruenzbedingung auf die positiven und negativen Zahlenpaare wurde varianzanalytisch ausgewertet. Neben den beiden Faktoren Art des Zahlenpaares (positiv vs. negativ) und Kongruenz (kongruent, neutral und inkongruent) wurde als weiterer Faktor die numerische Differenz (d = 1 bis d = 8) berücksichtigt, um dem Vorliegen des numerischen Distanzeffekts nachzugehen. Die Ergebnisse gibt Tabelle 4.16 wieder.

Aus Tabelle 4.16 geht hervor, dass alle drei Haupteffekte signifikant werden. So kann deutlich schneller auf positive (455 ms) im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren (504 ms) reagiert werden. Die mittleren Reaktionszeiten für kongruente, neutrale und inkongruente Zahlenpaare lauten: 432 ms, 432 ms und 452 ms, was einem mittleren Kongruenzeffekt von 20 ms zugunsten der kongruenten Bedingung entspricht. Der signifikante Haupteffekt numerische Differenz lässt auf das Auftreten des numerischen Distanzeffekts schließen. In Abbildung 4.16 wird dies an der Abnah-

Tabelle 4.16

Kennwerte der dreifaktoriellen Varianzanalyse

Effekt	df^*	F	p
Zahlenpaarart (Z)	1,11	150.177	<.0005
Kongruenz (K)	2,22	43.443	<.0005
num. Differenz (D)	7,77	70.329	<.0005 (*GG*)
Z×K	2,22	56.975	<.0005 (*GG*)
Z×D	7,77	1.738	.172 (*GG*)
K×D	14,154	1.229	.305 (*GG*)
Z×K×D	14,154	2.418	.041 (*GG*)

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

me der Reaktionszeiten mit Zunahme der numerischen Differenz ersichtlich. Insgesamt erfolgt die Beantwortung von Zahlenpaaren mit einer numerischen Differenz von $d = 1$ im Mittel nach 510 ms, während bei Zahlenpaaren mit einer numerischen Differenz von $d = 8$ nur noch 467 ms nötig waren. Die Interaktionen Kongruenz × numerische Differenz und Art des Zahlenpaares × numerische Differenz werden nicht signifikant.

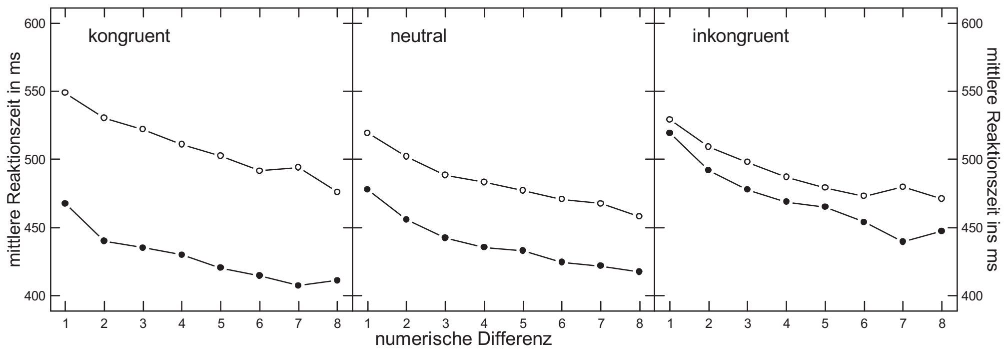


Abbildung 4.16. Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der numerischen Differenz für positive (gefüllte Kreise) und negative Zahlenpaare (ungefüllte Kreise). Links: kongruente Bedingung, Mitte: neutrale Bedingung, rechts: inkongruente Bedingung.

Für die Unterscheidung zwischen der Zahlenstrahl- und der Strategieannahme ist die Interaktion zwischen den beiden Faktoren Art des Zahlenpaares und Kongruenz ausschlaggebend. Während mit der Zahlenstrahlannahme keine signifikante Interaktion vorhergesagt wird, sollte es bei Gültigkeit einer der beiden Strategieannahmen eine Umkehr des Größenkongruenzeffekts im negativen Zahlenbereich geben, was sich in einer statistisch bedeutsamen Interaktion Zahlenpaarart × Kongruenz widerspiegeln sollte. Schon Abbildung 4.15 deutet darauf hin, dass es tatsächlich eine Interaktion zwischen den beiden Faktoren gibt. Das Ergebnis in Tabelle 4.16 bestätigt diese Vermutung. Die mittleren Reaktionszeiten für die kongruente, neutrale und inkongruente Bedingung der positiven Zahlenpaare lauten 437 ms, 447 ms und 482 ms. Innerhalb der positiven Zahlenpaare ergibt sich folglich mit 45 ms ein typischer Kongruenzeffekt. Dieser Reaktionszeitunterschied von 45 ms konnte zusätzlich mit einem t-Test abgesichert werden ($t_{11} = -8.871$, $p < .0005$). Bei den negativen Zahlenpaaren erhält man gemäß den Bedingungen kongruent, neutral und inkongruent mittlere Reaktionszeiten von 520 ms, 492 ms und 500 ms, was einem umgekehrten Kongruenzeffekt (−20 ms) entspricht. Auch dieser Reaktionszeitunterschied erfuhr durch einen *t*-Test (t_{11} = 4.518, p = .001) inferenzstatistische Absicherung.

Es könnte argumentiert werden, dass die geringe Ausprägung des Kongruenzeffekts im negativen Zahlenbereich dadurch zustande kommt, dass über zehn Sitzungen hinweg gemittelt wurde. Möglicherweise stimmte die Richtung des Kongruenzeffekts mit schnelleren Reaktionen in der kongruenten im Vergleich zur inkongruenten Bedingung zu Beginn des Experiments bei positiven und negativen Zahlenpaaren überein und kehrte sich im Laufe des Experiments bei den negativen Zahlenpaaren um. Aus diesem Grund wurden die Ursprungsdaten der elf Sitzungen einer weiteren Analyse unterzogen, indem der Kongruenzeffekt getrennt für die Sitzungen 1–11 bestimmt wurde. Dazu wurden erneut *trimmed means* mit einer *trimmed mean*-Rate von 20 % berechnet. Die Berechnung beschränkte sich auf die sechs möglichen Kombinationen von Art des Zahlenpaares (positiv vs. negativ) und Kongruenz (kongruent, neutral, inkongruent), womit nun 72 Werte pro Bedingung in die Bestimmung der *trimmed means* eingehen. Pro Versuchsperson und Sitzung erhält man somit sechs *trimmed means*.

Die graphische Darstellung dieser zweiten Auswertung gibt der linke und rechte Teil von Abbildung 4.17 wieder. Für die Beantwortung positiver Zahlenpaare werden in der 1. Sitzung im Mittel 558 ms benötigt, in der 11. Sitzung erfolgt die Antwort im Mittel nach 413 ms. Für negative Zahlenpaare sind in der 1. Sitzung im Mittel 635 ms nötig, was sich bis zur 11. Sitzung auf einen Wert von 454 ms verringert.

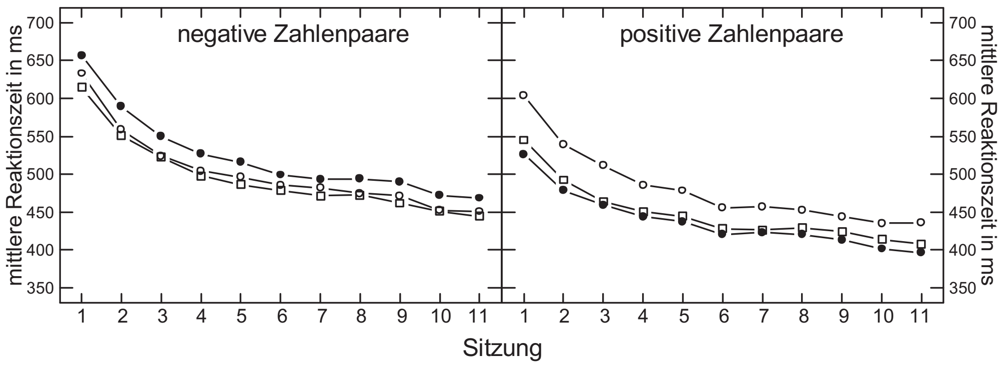


Abbildung 4.17. Mittlere Reaktionszeiten der kongruenten (gefüllte Kreise), neutralen (ungefüllte Quadrate) und inkongruenten Bedingung (ungefüllte Kreise) im Verlauf der Sitzungen 1–11.

Während in der ersten Sitzung zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren eine Reaktionszeitdifferenz von 77 ms vorliegt, beträgt diese in der elften Sitzung nur noch 41 ms. Bezüglich der negativen Zahlen lässt sich feststellen, dass der Kongruenzeffekt von der ersten Sitzung an in umgekehrter Weise mit schnelleren Reaktionen in der inkongruenten im Vergleich zur kongruenten Bedingung auftritt. Bei den positiven Zahlenpaaren hingegen werden in allen elf Sitzungen kürzere Reaktionszeiten in der kongruenten im Vergleich zur inkongruenten Bedingung produziert. Dies bedeutet, dass das Muster des Kongruenzeffekts nicht durch das Bilden eines Mittelwertes über elf Sitzungen hinweg entsteht.

Tabelle 4.17 soll einen weiteren Aspekt der Gegenüberstellung positiver und negativer Zahlenpaare verdeutlichen. Betrachtet man die Größe des Kongruenzeffekts bei den positiven Zahlenpaaren über den Verlauf des Experiments, so beträgt dieser 77 ms in der ersten Sitzung und erreicht ab der 4. Sitzung mit 42 ms ein stabiles Niveau. Bei den negativen Zahlenpaaren hingegen schwankt die Ausprägung des Kongruenzeffekts nur geringfügig um im Mittel −21 ms. Eine Abnahme des Effekts über den Verlauf des Experiments ist nicht ersichtlich.

Tabelle 4.17

Der mittlere Kongruenzeffekt in ms für die Sitzungen 1–11 für positive und negative Zahlenpaare

	Sitzung										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zahlenpaarart											
positiv	77	61	52	42	41	35	34	32	31	34	39
negativ	–24	–31	–26	–23	–21	–13	–12	–19	–19	–20	–18

4.5.3.3 Analyse der gemischten Zahlenpaare

Wie weiter oben schon angemerkt, unterscheidet sich das Ergebnismuster der gemischten Zahlenpaare deutlich von dem der positiven bzw. negativen Zahlenpaare. Aus Abbildung 4.15 ging schon recht deutlich hervor, dass es innerhalb der gemischten Zahlenpaare keinen Einfluss der Kongruenzbedingung zu geben scheint. Abbildung 4.18 lässt zusätzlich vermuten, dass auch der numerische Distanzeffekt innerhalb der gemischten Zahlenpaare ausbleibt. Dabei gibt der linke Teil von Abbildung 4.18 den Einfluss der absolut numerischen und der rechte Teil den Einfluss der numerischen Differenz wieder. Der Begriff absolute numerische Differenz bezieht sich auf die Differenz der Absolutbeträge der beiden Zahlen. Beispielsweise hat das Zahlenpaar −5 3 eine absolute numerische Differenz von $|-5|-|3| = 2$. Der Begriff numerische Differenz bezieht sich auf den Absolutbetrag der Differenz der beiden Zahlen, er gibt also die gewohnte numerische Differenz wieder. Das Zahlenpaar −5 3 hat demzufolge eine numerische Differenz von $|-5-3| = 8$. Abbildung 4.18 ist zu entnehmen, dass sich weder die absolute numerische noch die numerische Differenz auf die Reaktionszeiten auswirkt.

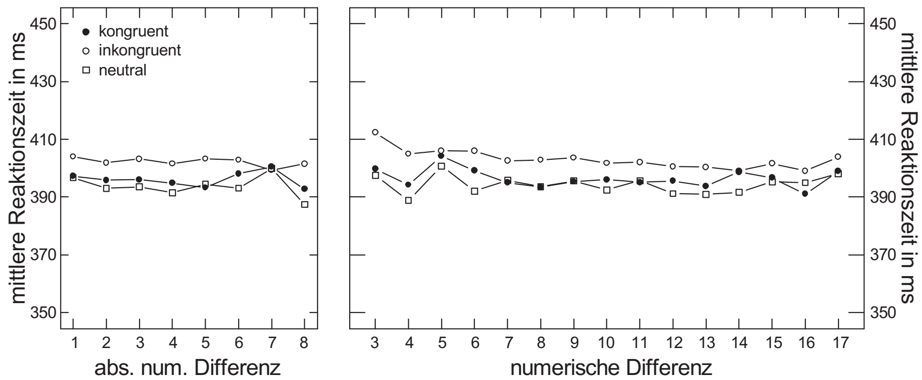


Abbildung 4.18. Der Einfluss der absolut numerischen (links) und numerischen Differenz (rechts) auf die mittleren Reaktionszeiten getrennt für kongruente, neutrale und inkongruente gemischte Zahlenpaare.

Eine zweite Möglichkeit, den Einfluss der numerischen Größe innerhalb der gemischten Zahlenpaare zu testen, ergibt sich durch die Unterscheidung zwischen numerisch kongruenten und numerisch inkongruenten Zahlenpaaren. Im Gegensatz zu Fischer (2003) bezieht sich der Begriff numerische Kongruenz nicht auf die Anordnung der beiden Zahlen eines Zahlenpaares, sondern auf die Übereinstimmung zwischen numerischer und absoluter numerischer Größe einer Zahl. In einem numerisch inkongruenten Zahlenpaar stimmt die absolut größere Zahl nicht mit der numerisch größeren überein. Als Beispiel dient das Zahlenpaar −8 1. Zwar ist die Zahl 1 die numerisch größere der beiden Zahlen, jedoch gilt $|-8| > 1$. Hingegen wird ein Zahlenpaar dann als numerisch kongruent bezeichnet, wenn die numerisch größere Zahl auch gleichzeitig die absolut größere Zahl ist, was auf das Zahlenpaar −1 7 zutrifft. Aus Gründen der besseren Abgrenzung zur numerischen Kongruenz wird Kongruenz im Sinne des Größenkongruenzeffekts nachfolgend als Größenkongruenz mit den beiden Ausprägungen größenkongruent und größeninkongruent bezeichnet. Die Zusammenhänge zwischen den drei Variablen Größenkongruenz, numerische Kongruenz und absolute numerische Differenz werden in Abbildung 4.19 dargestellt.

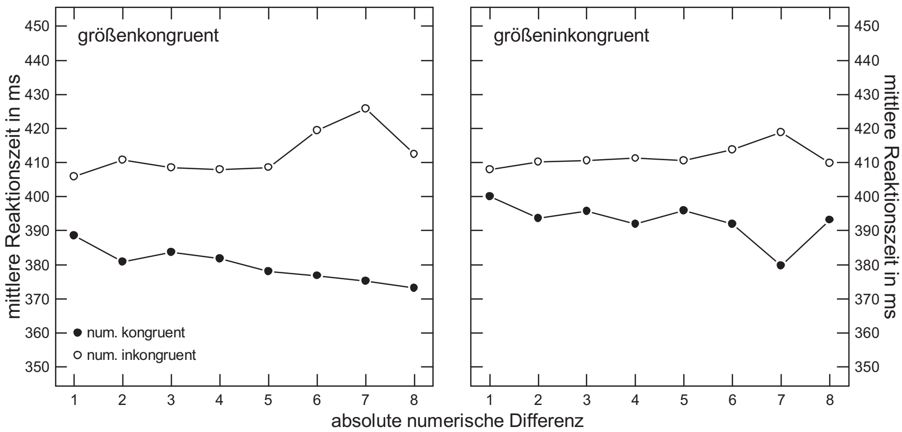


Abbildung 4.19. Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der numerischen Differenz und der numerischen Kongruenz getrennt für größenkongruente (links) und größeninkongruente Zahlenpaare (rechts).

In Bezug auf die numerische Kongruenz vermittelt Abbildung 4.19 den Eindruck, dass die Reaktionszeiten, die sich für die gemischten Zahlenpaare ergeben, vom Zusammenwirken der numerischen und absoluten Größe beeinflusst werden. Des Weiteren gibt Abbildung 4.19 einen ungewöhnlichen Einfluss der numerischen Differenz wieder: einen Anstieg der Reaktionszeiten mit Zunahme der numerischen Differenz. Diesem Datenmuster wurde mit einer dreifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung auf allen Faktoren nachgegangen. Neben den beiden Faktoren numerische Kongruenz (numerisch kongruent vs. numerisch inkongruent) und absolute Differenz ($d = 1$ bis $d = 8$) wurde auch die Größenkongruenz als zweistufige Variable (größenkongruent vs. größeninkongruent) in die Analyse aufgenommen. Die Ergebnisse dieser dreifaktoriellen Varianzanalyse sind in Tabelle 4.18 nachzulesen. Die Varianzanalyse liefert zwei signifikante Haupteffekte und zwei signifikante Interaktionen. Die Signifikanz des Haupteffekts Größenkongruenz ist überraschend, zumal es sich um einen geringen Reaktionszeitvorteil der größenkongruenten (396 ms) gegenüber den größeninkongruenten Zahlenpaaren (402 ms) handelt. Hingegen bestätigt der signifikante Unterschied von 25 ms zwischen numerisch kongruenten und numerisch inkongruenten Zahlenpaaren den Eindruck aus Abbildung 4.19. Die signifikante Interaktion numerische Kongruenz × absolute Differenz lässt verstehen, weshalb der Haupteffekt absolute Differenz das Signifikanzniveau nicht erreicht. Für numerisch kongruente Zahlenpaare ergibt sich eine Abnahme der Reaktionszeiten mit der absolut numerischen Differenz von 393 ms ($d = 1$) auf 379 ms ($d = 8$). Dieses Muster entspricht einem geringen numerischen Distanzeffekt von 14 ms. Betrachtet man allerdings den Verlauf der Reaktionszeiten innerhalb der numerisch inkongruenten Zahlenpaare, so ist scheinbar ein Anstieg der Reaktionszeiten zu verzeichnen. Dieser kommt allerdings bei genauerem Hinsehen nur durch die beiden absoluten numerischen Differenzen $d = 6$ und $d = 7$ zustande; alle anderen Datenpunkte sind um den Wert 410 ms angesiedelt. Auch die Interaktion zwischen der Größenkongruenz und der numerischen Kongruenz wird signifikant. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Größenkongruenzeffekt innerhalb der numerisch kongruenten Zahlenpaare eine Größe von 12 ms aufweist, während er innerhalb der numerisch inkongruenten Zahlenpaare lediglich 1 ms beträgt.

Tabelle 4.18

Kennwerte der dreifaktoriellen Varianzanalyse

Effekt	df^*	F	p
Größenkongruenz (G)	1,11	5.342	.041
numerische Kongruenz (N)	1,11	23.079	.001
absolute Differenz (D)	7,77	0.7	.541 (*GG*)
G×N	1,11	8.493	.014
G×D	7,77	1.363	.276 (*GG*)
N×D	7,77	10.518	<.0005 (*GG*)
G×N×D	7,77	1.069	.367 (*GG*)

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

Da sich für die numerische Differenz kein vergleichbarer Zusammenhang zeigte, wurde für deren Auswertung auf eine lineare Regression der Art $RT = a + b * numDiff$ zurückgegriffen. Dies scheint angemessen, da die unabhängige Variable numerische Differenz (numDiff) 15 Stufen aufweist. Als Kriterium wurde die Reaktionszeit (RT) verwendet. Als Regressionslösung erhält man für den Achsenabschnitt a einen Wert von 401 mit einem Konfidenzintervallbereich von $[397, 404]$. Die Regressionslösung für den Anstieg lautet $b = -0.27$ mit einem Konfidenzintervallbereich von $[-1, 0]$. Gemäß der Methode nach Lorch und Myers (1990) wurden die Koeffizienten zunächst für jede Versuchsperson einzeln bestimmt. Im Anschluss wurden die so erhaltenen Koeffizienten mittels Ein-Stichproben-t-Test gegen Null abgesichert. Diese Methode liefert einen signifikant von Null verschiedenen Achsenabschnitt a ($t_{11} = 56.259$, $p < .0005$). Hingegen verfehlt der Anstieg b das Signifikanzniveau ($t_{11} = -1.502$, $p = 0.161$), womit der Einfluss der numerischen Differenz auf die Reaktionszeiten nicht vorzuliegen scheint.

Sowohl im linken als auch im rechten Teil von Abbildung 4.18 ist auffällig, dass die Reaktionen auf größeninkongruente Zahlenpaare fast durchgängig langsamer sind als auf größenkongruente oder neutrale Zahlenpaare. Aus diesem Grund wurde der Möglichkeit nachgegangen, ob zu Beginn des Experiments ein Einfluss der Größenkongruenz vorlag. In Abbildung 4.20 wurden die mittleren Reaktionszeiten aller drei Größenkongruenzbedingungen pro Sitzung dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Größenkongruenzeffekt zu Beginn des Experiments stärker ausgeprägt

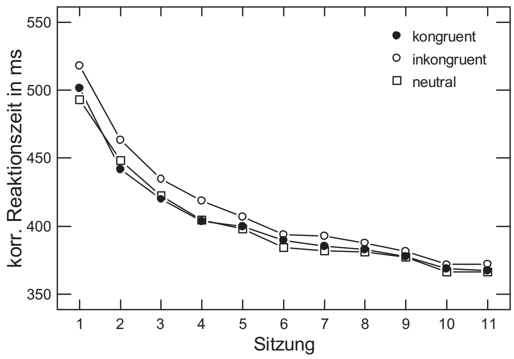


Abbildung 4.20. Der Einfluss der Kongruenz über den Verlauf der elf Sitzungen.

ist, nach wenigen Sitzungen jedoch auf einen sehr kleinen Wert absinkt.

Zur Überprüfung des Größenkongruenzeffekts über die elf Sitzungen wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den beiden Messwiederholungsfaktoren Größenkongruenz (größenkongruent, größeninkongruent) und dem 11-stufigen Faktor Sitzung gerechnet. Der Haupteffekt Größenkongruenz erreicht Signifikanz ($F_{1,11} = 8.811$, $p = .013$). Auf größenkongruente Zahlenpaare kann im Mittel 9 ms schneller geantwortet werden als auf größeninkongruente Zahlenpaare. Ebenfalls signifikant wird der Haupteffekt Sitzung ($F_{10,110} = 38.610$, $p < .0005$ nach GG). Während in der 1. Sitzung im Mittel 510 ms zur Beantwortung gemischter Zahlenpaare benötigt wurden, erfolgte die Reaktion in der 11. Sitzung schon nach 370 ms. Auch die Interaktion Größenkongruenz × Sitzung wird signifikant ($F_{10,110} = 4.765$, $p = .006$ nach GG). Dabei handelt es sich in der 1. Sitzung um einen Effekt von 16 ms, der ab der 5. Sitzung Werte kleiner 10 ms annimmt. In der 11. Sitzung besteht zwischen größeninkongruenten und größenkongruenten Zahlenpaaren nur noch eine Reaktionszeitdifferenz von 5 ms. Die inhaltliche Interpretation eines so geringen Wertes erscheint erneut fraglich. Die Stabilität des Effekts über alle elf Sitzungen legt allerdings nahe, dass dieser bei den gemischten Zahlenpaaren nicht durch Zufall zustande kommt, wodurch ein geringer Einfluss der Größenkongruenz auch bei den gemischten Zahlenpaaren gefunden werden kann.

4.5.4 Diskussion

Mit dem fünften Experiment der vorliegenden Arbeit sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, zwischen der Strategieannahme einerseits und der Annahme eines negativen mentalen Zahlenstrahls andererseits zu unterscheiden. Bei Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls wurde sowohl im positiven wie auch im negativen Zahlenbereich ein Reaktionszeitvorteil der größenkongruenten (z. B. −3 −5) im Vergleich zu den größeninkongruenten Zahlenpaaren (z. B. −3 −5) vorhergesagt. Kommen hingegen bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare Strategien zum Einsatz, so sollten kürzere Reaktionszeiten auf größeninkongruente im Vergleich zu größenkongruenten Zahlenpaaren produziert werden.

Zunächst sollte festgehalten werden, dass auf positive im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren deutlich schneller reagiert werden konnte. Dabei handelt es sich um einen Reaktionszeitunterschied von 45 ms. Dies steht gut im Einklang mit dem von Lochmann (2005) gefundenen Reaktionszeitunterschied von 69 ms. Auch Fischer (2003) sowie Shaki und Petrusic (2005) berichteten deutlich schnellere Reaktionen auf positive im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren. Der numerische Distanzeffekt konnte sowohl im positiven als auch im negativen Zahlenbereich gefunden werden. Die nicht-signifikante Interaktion zwischen Art des Zahlenpaares und numerischer Differenz deutet darauf hin, dass positiven und negativen Zahlenpaaren ähnliche Prozesse zugrunde liegen.

Im positiven Zahlenbereich entsprach das Ergebnis zum Größenkongruenzeffekt einer Replikation der Ergebnisse von Henik und Tzelgov (1982). Im negativen Zahlenbereich wies der Größenkongruenzeffekt jedoch eine umgekehrte Form auf: Versuchspersonen konnten schneller auf größeninkongruente als auf größenkongruente Zahlenpaare antworten. Für die positiven Zahlenpaare ergab sich ein Reaktionszeitvorteil der größenkongruenten gegenüber den größeninkongruenten Zahlenpaaren von 45 ms. Über den Verlauf der elf Sitzungen sank der Größenkongruenzeffekt von 77 ms in der 1. Sitzung auf 39 ms in der 11. Sitzung ab. Hingegen war der umgekehrte Größenkongruenzeffekt im negativen Zahlenbereich mit −20 ms deutlich schwächer ausgeprägt. Anders als im positiven Zahlenbereich wies dieser in allen elf Sitzungen eine recht stabile Ausprägung von im Mittel −21 ms auf.

Somit kann geschlussfolgert werden, dass sich die Übereinstimmung zwischen der absoluten numerischen Größe und der physikalischen Größe auf das Urteil der Versuchsperson auswirkt. Diese Beurteilung der absoluten numerischen Größe steht mit den Vorhersagen der beiden Strategieannahmen im Einklang, weshalb das Ergebnis zum Größenkongruenzeffekt für negative Zahlenpaare als Bestätigung der Strategieannahme gewertet wird. Mit diesem Ergebnis kann jedoch nicht entschieden werden, ob zur Auswahl der numerisch größeren zweier negativer Zahlen die Strategie der Instruktionsumkehr oder die Strategie der Reaktionsumkehr eingesetzt wird. Die Umkehr des Größenkongruenzeffekts widerlegt somit die Zahlenstrahlannahme in ihrer bisherigen Darstellung. Die nun folgenden Ausführungen sollen zeigen, dass die Annahme eines negativen mentalen Zahlenstrahls nur durch eine entscheidende Modifikation beibehalten werden kann.

Die Zahlenstrahlannahme beinhaltet die Idee, dass negativen Zahlen eigenständige mentale Größenrepräsentationen zugrunde liegen. So wurde für die negativen Zahlen angenommen, dass die Eigenschaften ihrer numerischen Größenrepräsentation als Analogon der mathematischen numerischen Eigenschaften negativer Zahlen aufgefasst werden können. In gleicher Weise wie aufgrund der analogartigen mentalen Größenrepräsentationen der Zahlen 9 und 3 die Aussage „9 ist numerisch größer als 3“ abgeleitet werden kann, wurde der mentalen Größenrepräsentation der Zahl −9 beispielsweise auch das Merkmal „ist numerisch kleiner als −3“ zugeschrieben. Entgegen dieser Annahme deuten die Ergebnisse zum Größenkongruenzeffekt darauf hin, dass beispielsweise die Zahl −9 nicht als numerisch kleine Zahl repräsentiert wird. Stimmt in der Zahlenpaardarstellung die numerische mit der physikalischen Größe wie beim Zahlenpaar −3 −9 überein, so resultiert daraus ein Anstieg der Reaktionszeiten. Aufgrund der Ergebnisse der ERP-Studie von Schwarz und Heinze (1998) entsteht der Größenkongruenzeffekt auf einer frühen Verarbeitungsstufe und gibt deshalb Eigenschaften der mentalen Größenrepräsentation wieder. Laut diesem Ansatz müssen die physikalische und numerische Größe der entsprechenden Zahlen zunächst in eine gemeinsame Repräsentation integriert werden, bevor die Antwortauswahl und die sich daran anschließende Antwortabgabe stattfinden kann. Bei Übereinstimmung der physikalischen und numerischen Größe kann die gemeinsame Repräsentation entsprechend schneller erstellt werden. Folgt man diesem

Ansatz, so könnte der umgekehrte Größenkongruenzeffekt bei den negativen Zahlen auch damit erklärt werden, dass es einen negativen mentalen Zahlenstrahl gibt, auf dem die absoluten numerischen Größen der negativen Zahlen mental repräsentiert werden.

Im Alltag lassen sich für diesen Erklärungsansatz durchaus plausible Argumente aufzeigen. Bedenkt man, in welchen Lebensbereichen negative Zahlen Anwendung finden, kommen wahrscheinlich Temperaturen und Schulden als erstes in den Sinn. Wenn eine Temperatur von −9 °C herrscht, dann wird dies im Vergleich zu einer Temperatur von −1 °C als kälter empfunden. In diesem Kontext wird die Zahl −9 im Vergleich zur Zahl −1 mit ‚mehr' assoziiert, obwohl sie numerisch-mathematisch gesehen als kleinere der beiden definiert ist. Ähnlich verhält es sich mit Schulden, die gerade in der Schule bei der Einführung des Konzepts der negativen Zahlen zur Anwendung kommen. Hat man beispielsweise bei einer Person A 8 € und bei einer Person B 2 € Schulden, so schuldet man der Person A im Vergleich zur Person B ‚mehr' Geld. Setzt man Schulden mit negativen (Geld-) Beträgen gleich, so ist auch hier der Absolutbetrag für den numerischen Vergleich entscheidend.

Fasst man die numerische als objektive Größe auf und die absolute als subjektive Größe, auf der die mentale Größenrepräsentation basiert, so könnte man zu der Aussage gelangen, dass die höheren Reaktionszeiten auf negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren deshalb entstehen, weil die objektive Größe einer Zahl nicht mit ihrer subjektiven einhergeht. Die Zahl −9 wird demzufolge im Vergleich zu den restlichen einstelligen negativen Zahlen gar nicht als ‚kleine' Zahl wahrgenommen und verarbeitet. Bei der Bearbeitung negativer Zahlen entsteht zwischen der objektiven und subjektiven numerischen Größe eine Interferenz, die vor der Antwortauswahl aufgelöst werden muss. Dies widerlegt nicht die Annahme eines negativen mentalen Zahlenstrahls. Als Zusatz muss lediglich formuliert werden, dass die auf dem negativen Zahlenstrahl kodierte numerische Größe mit der absoluten numerischen Größe eingeht, was bedeutet, dass subjektiv große negative Zahlen (z. B. −8) mathematisch gesehen einen numerisch kleinen Wert aufweisen. Diese Annahme wird im Folgenden als *Interferenzannahme* bezeichnet. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Ergebnisse zum Größenkongruenzeffekt bei negativen Zahlen sowohl durch die Interferenzannahme als auch durch die Strategieannahme erklärt werden können.

Auch die Ergebnisse der gemischten Zahlenpaare müssen einer eingehenden Diskussion unterzogen werden. Wie schon in der Arbeit von Lochmann (2005) konnte zunächst kein Hinweis auf den numerischen Distanzeffekt gefunden werden. So ließ sich weder ein Einfluss der absoluten numerischen noch der numerischen Differenz aufzeigen. Des Weiteren stimmen die weitaus schnelleren Reaktionen auf gemischte im Vergleich zu negativen und positiven Zahlenpaaren mit den Ergebnissen von Lochmann überein. Der Größenkongruenzeffekt betrug 6 ms. Trotz statistischer Absicherung ist eine inhaltliche Interpretation einer Reaktionszeitdifferenz in solch kleiner Ausprägung fragwürdig. Ungeachtet dessen kann Zufall für das Zustandekommen des geringen Größenkongruenzeffekts nicht herangezogen werden, da sich der Reaktionszeitnachteil der inkongruenten im Vergleich zu den kongruenten gemischten Zahlenpaaren konsistent über alle elf Sitzungen hinweg aufzeigen ließ. Die Berücksichtigung der sog. numerischen Kongruenz erwies sich allerdings als äußerst aufschlussreich. So wurden auf gemischte Zahlenpaare, deren negative Zahl dem Absolutbetrag nach kleiner war als die positive Zahl (z. B. −3 9), kürzere Reaktionszeiten produziert als auf Zahlenpaare, bei denen die negative Zahl die absolut größere Zahl des Zahlenpaares darstellte (z. B. −9 3). Ein geringfügiger Einfluss der numerischen Differenz ließ sich allerdings nur für die numerisch kongruenten Zahlenpaare nachweisen. Dieses Ergebnis liefert zum ersten Mal einen Beleg dafür, dass die numerische bzw. absolute Größe auch bei gemischten Zahlenpaaren verarbeitet wird. Im Experiment von Lochmann betrug der Reaktionszeitunterschied zwischen numerisch kongruenten und numerisch inkongruenten Zahlenpaaren nur 10 ms. Zwar zeigte sich auch dort ein ähnlicher Zusammenhang zwischen numerischer Kongruenz und absoluter Differenz. Dieser war jedoch bei Weitem nicht so stark ausgeprägt und konnte größtenteils auf stark verlangsamte Reaktionen auf solche Zahlenpaare zurückgeführt werden, die die 1 als positive Zahl enthielten[8]. Es bleibt also weiteren Untersuchungen vorbehalten, sich dem Einfluss der numerischen Kongruenz auf die Reaktionszeiten gemischter Zahlenpaare zuzuwenden.

Inwieweit können die Ergebnisse der gemischten Zahlenpaare nun zur Beantwortung der Frage nach der mentalen Repräsentation negativer Zahlen beitragen? Der Einfluss der numerischen Kongruenz könnte als Beleg für die Interferenzannahme herangezogen werden, mit der vorhergesagt werden kann, weshalb die Reaktionszeiten numerisch kongruenter Zahlenpaare kürzer sind. Beispielsweise ist im numerisch inkongruenten Zahlenpaar −9 1 die Zahl −9 subjektiv größer als die Zahl 1 und dennoch wäre 1 die numerisch größere Zahl. Hier müsste also zunächst eine Interferenz aufgelöst werden. Im numerisch kongruenten Zahlenpaar 7 −2 wäre die Zahl −2 eine subjektiv kleine Zahl, weshalb die korrekte Antwort zugunsten der 7 schneller abgegeben werden kann. Entgegen der Interferenzannahme kann die automatische Aktivierung der mentalen Größenrepräsentation auf dem negativen mentalen Zahlenstrahl jedoch ausgeschlossen werden. Hätte die negative Zahl automatisch die mentale Repräsentation auf der negativen Seite des Zahlenstrahls und die positive Zahl die mentale Repräsentation auf der positiven Seite des Zahlenstrahls aktiviert, so hätte sich ein deutlicher Einfluss der numerischen Differenz auf die Reaktionszeiten ergeben müssen. Dies muss mit dem insignifikanten Ergebnis der numerischen Differenz jedoch klar zurückgewiesen werden. Somit ist die Interferenzannahme nicht in der Lage, die Ergebnisse der gemischten Zahlenpaare vollständig zu erklären.

Die Strategieannahme bezieht sich nur auf die Anwendung von Strategien beim numerischen Vergleich zweier negativer Zahlen. Für den numerischen Vergleich einer positiven mit einer negativen Zahl lassen sich demzufolge keine Vorhersagen ableiten. Allerdings spricht das Ausbleiben des als robust anzusehenden numerischen Distanzeffekts (Poltrock, 1989) sowie die äußerst kurzen Reaktionszeiten dagegen, dass bei gemischten Zahlenpaaren tatsächlich ein numerischer Vergleich stattgefunden hat. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse dahingehend interpretiert, dass die von Lochmann (2005) vorgeschlagene Kategorisierung anhand des Vorzeichens auch in diesem Experiment Anwendung fand. Sobald ein Zahlenpaar aus einer positiven und einer negativen Zahl besteht, wird die Seite ausgewählt, auf der das Pluszeichen zu finden ist. Der gefundene Einfluss der numerischen Kongruenz macht deutlich, dass diese einfache Kategorisierungsaufgabe nicht unabhängig von der numerischen bzw. absolut numerischen Größe stattgefunden hat. Obwohl die numerische Größe also für die Entscheidung der Versuchsperson unbedeutend ist, wirkt sie sich auf die Reaktionszeiten aus. Schon Duncan und McFarland (1980) konnten in ihrem Experiment eindrucksvoll zeigen, dass es trotz Irrelevanz der numerischen Größe eine automatische Aktivierung dieser gibt. Den Versuchspersonen wurden jeweils Paare mit identischen oder verschiedenen Zahlen darboten. Dabei sollte die einfache Entscheidung getroffen werden, ob es sich um identi-

[8]Dabei wurde argumentiert, dass auf Zahlenpaare mit der positiven Zahl 1 deshalb höhere Reaktionszeiten zustande kommen, weil die Entscheidung unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ zugunsten einer numerisch kleinen Zahl ausfallen muss.

sche oder verschiedene Zahlen handelte. Obwohl sich die Aufgabenstellung auf die physikalischen Eigenschaften des numerischen Materials bezog, trat deutlich der Einfluss der numerischen Differenz zutage. Auf Zahlenpaare mit einer großen numerischen Differenz (z. B. 9 2) konnte schneller mit *different* reagiert werden als auf Zahlenpaare mit einer kleinen numerischen Differenz (z. B. 3 1). Dieses erstaunliche Ergebnis wurde später von Dehaene und Akhavein (1995) repliziert. Einen weiteren Beleg liefert das Experiment von Fischer und Rottmann (2005, Exp. 2), in welchem einstellige positive und negative Zahlen danach kategorisiert werden sollten, ob sie größer oder kleiner als 0 sind. Diese Entscheidung konnte allein anhand des Vorzeichens getroffen werden. Dennoch zeigte sich für die positiven Zahlen ein Einfluss der numerischen Differenz zur Zahl 0.

Die Ergebnisse von Duncan und McFarland (1980), Dehaene und Akhavein (1995) sowie Fischer und Rottmann (2005) sprechen demzufolge dafür, dass die mentale Repräsentation der numerischen Größe auch dann aktiviert wird, wenn diese für die Ausführung der Aufgabe irrelevant ist. Vor diesem Hintergrund ist es plausibel anzunehmen, dass Versuchspersonen im vorliegenden Experiment bei gemischten Zahlenpaaren ihre Urteile anhand des Vorzeichens abgaben.

4.6 Experiment 6: Die Selbstinstruktion – I

4.6.1 Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Strategieannahme bisher auf die Weise erklärt, dass zur Auswahl der korrekten Antwort bei einem negativen Zahlenpaar eine Strategie eingesetzt wird. Nachfolgend soll der Frage nachgegangen werden, ob diese Strategie verbaler Natur ist. So könnte man die Strategie mit dem Begriff der verbalen Selbstinstruktion in Verbindung bringen. Versuchspersonen instruieren sich – zur korrekten Auswahl der numerisch größeren zweier negativer Zahlen – selbst, die absolut größere der beiden Zahlen mit entsprechender Reaktionsumkehr bzw. die absolut kleinere der beiden Zahlen auszuwählen. Fasst man diese bei negativen Zahlen möglicherweise zur Anwendung kommende Selbstinstruktion als subvokale Sprache (*inner speech*) auf, stellt sich die Frage nach deren experimenteller Manipulation. Aufgaben zum *task switching* liefern eine Antwort darauf. Dort konnte wiederholt gezeigt werden, dass subvokale Sprache von parallel zur Primäraufgabe ausgeführter artikulatorischer Unterdrückung beeinflusst wird. Bedeutsam dabei ist, dass Aufgaben zur artikulatorischen Unterdrückung, wie beispielsweise das wiederholte Aussprechen einfacher Wörter („the, the, the . . . “) oder das Wiederholen kurzer, gut gelernter Sequenzen (z. B. „1, 2, 3, 4 . . . “) selektiv die artikulatorische Verarbeitung, nicht aber exekutive Kontrollprozesse beeinträchtigen (Baddeley, Lewis & Vallar, 1984; zit. nach Bryck & Mayr, 2005).

Baddeley, Chincotta und Adlam (2001, Exp. 2) konnten zeigen, dass die Leistung beim abwechselnden Addieren und Subtrahieren einstelliger Operanden durch artikulatorische Unterdrückung gestört wird. In dem Experiment bekamen Versuchspersonen Listen mit insgesamt 40 Operandenpaaren vorgelegt. Der linke Operand nahm Werte zwischen 1 und 9 an, der rechte Operand wurde mit 1 konstant gehalten. In der geblockten Bedingung sollten die ersten 20 Zahlenpaare jeweils addiert, die letzten 20 subtrahiert und das Ergebnis hinter der jeweiligen Aufgabe notiert werden. In der alternierenden Bedingung waren die Versuchspersonen aufgefordert, Addition und Subtraktion abwechselnd auszuführen. Das Ausfüllen der Arbeitsblätter erfolgte mit und ohne Zweitaufgabe. In der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung sollten die Versuchspersonen parallel zum Ausfüllen des Aufgabenblatts die zwölf Monatsnamen der Reihe nach aufsagen („Januar, Februar, . . . “), der Takt wurde durch ein Metronom mit 60 BPM (*beats per minute*) vorgegeben. Die abhängige Variable war die Zeit, die zur Bearbeitung der jeweils 20 Aufgaben der geblockten bzw. alternierenden Bedingung benötigt wurde. Während artikulatorische Unterdrückung in der alternierenden Bedingung zu einer erhöhten Gesamtbearbeitungszeit im Vergleich zur Kontrollbedingung führte, trat dieser Effekt in der geblockten Bedingung nicht auf. In einem Kontrollexperiment (Exp. 6) waren die Versuchspersonen in der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung aufgefordert, anstelle des Aufzählens der Monatsnamen das Wort *the* zu wiederholen. Selbst mit dem Wiederholen dieses einfachen Wortes konnte das Addieren bzw. Subtrahieren in der alternierenden nicht aber in der geblockten Bedingung gestört werden. Die Autoren schlussfolgerten, dass die geforderte Operation (Addition oder Subtraktion) in der alternierenden Bedingung vor jedem zu bearbeitenden Operandenpaar innerlich im Sinne einer Selbstinstruktion („plus“ – „minus“ – „plus“ – . . .) wiederholt werden muss. Da die Selbstinstruktion eine verbale Komponente hat, kann sie durch artikulatorische Unterdrückung gestört werden, was einen Anstieg der Bearbeitungszeit pro Aufgabe zur Folge hat. In der geblockten Bedingung muss die Aufgabenstellung nicht ständig aktualisiert werden, Selbstinstruktion ist folglich nicht notwendig, weshalb das Aufsagen der Monatsnamen oder Aussprechen des Wortes *the* keine Beeinträchtigung verursacht.

Auch Emerson und Miyake (2003) griffen auf das eben beschriebene Paradigma zurück. Den Versuchspersonen wurden auf einem Aufgabenblatt drei Spalten mit je 30 zweistelligen Zahlen im Bereich $[10,\ldots,99]$ präsentiert. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, in der ersten Spalte zu jedem Operanden die Zahl 3 zu addieren bzw. in der zweiten Spalte die Zahl 3 zu subtrahieren und das Ergebnis hinter der Aufgabe aufzuschreiben (geblockte Bedingung). In der dritten Spalte galt es, Subtraktion bzw. Addition im Wechsel auszuführen (alternierende Bedingung). Da Emerson und Miyake am Einfluss der subvokalen Sprache auf den Aufgabenwechsel interessiert waren, wurde auch hier artikulatorische Unterdrückung als Zweitaufgabe ausgewählt. Die Versuchspersonen sollten im Takt eines Metronoms mit 80 BPM die Buchstabenfolge „a-b-c" wiederholen. Außerdem wählten die Autoren eine weitere Zweitaufgabe, um zeigen zu können, dass artikulatorische Unterdrückung einen spezifischen Einfluss auf die subvokale Sprache und damit auf die Wechselkosten hat und nicht das Ausführen einer Zweitaufgabe im Allgemeinen. Diese Aufgabe beinhaltete das Klopfen des Metronomtaktes mit einem der beiden Füße (*foot tapping*). Selbstverständlich gab es eine Kontrollbedingung ohne Zweitaufgabe, in der jedoch das Metronom eingeschaltet war, um den Geräuschpegel während der drei Aufgabenbedingungen konstant zu halten. Verglichen mit der Kontrollbedingung benötigten Versuchspersonen in den Bedingungen mit Zweitaufgaben im Mittel mehr Zeit zur Bearbeitung der Aufgaben. In der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung wurden jedoch die höchsten mittleren Bearbeitungszeiten pro Aufgabe produziert. Als Maß für die Wechselkosten wurde zunächst die Differenz aus der Gesamtbearbeitungszeit der alternierenden und geblockten Bedingung berechnet und dann durch die Anzahl der Aufgabenwechsel (29) geteilt. Derart gab es keinen Unterschied der Wechselkosten der Kontroll- im Vergleich zur *foot tapping*-Bedingung. Im Gegensatz dazu führte artikulatorische Unterdrückung zu einem signifikanten Anstieg der Wechselkosten im Vergleich zur Kontrollbedingung und zu *foot tapping*. Wenn man davon ausgeht, dass zur Ausführung der Aufgabe in der alternierenden Bedingung eine Strategie in Form verbaler Selbstinstruktion zur Anwendung kam, so liefert dieses Ergebnis einen weiteren Beleg für die Beeinträchtigung dieser durch artikulatorische Unterdrückung. In einem weiteren Experiment testeten die Autoren den Einfluss von Cues auf die Wechselkosten. Neben einer Bedingung ohne Cues wurden in einer anderen Bedingung die Operationen (Addition vs. Subtraktion) in Form farbiger Zahlen angegeben, beispielsweise sollte auf Zahlen in roter Schriftfarbe drei addiert und von Zahlen in schwarzer Schriftfarbe drei subtrahiert werden. In einer weiteren Bedingung gaben Plus- bzw. Minuszeichen hinter den Zahlen die entsprechende Operation explizit an. Die drei Cue-Bedingungen wurden entweder ohne Zweitaufgabe oder mit artikulatorischer Unterdrückung ausgeführt. Der restliche Versuchsaufbau stimmte mit dem eben berichteten überein. Insgesamt zeigte die Art des Cues (keiner, Farbe, Operationszeichen) keinen unterschiedlichen Einfluss auf die mittlere Bearbeitungszeit. Allerdings führte die Darstellung von arbiträren Farbcues und expliziten Operationscues zu einer Verringerung der Wechselkosten im Vergleich zur Bedingung ohne Cues. Entscheidend ist allerdings das Ergebnis, dass die Verwendung expliziter Operationscues immer noch signifikant höhere Wechselkosten in der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung zur Folge hatte.

Mit der Verwendung des Listen-Paradigmas sind zahlreiche Nachteile verbunden. Die Gesamtbearbeitungszeit wird meist mit der Stoppuhr gemessen, die Messung der Lösungszeit pro Aufgabe ist somit nicht möglich. Auch das Aufschreiben der Ergebnisse sowie die Korrektur von Fehlern fließen in die Gesamtbearbeitungszeit ein. Des Weiteren kann nicht ausgeschlossen werden, dass während des Notierens des Ergebnisses schon an der nächsten Aufgabe weitergearbeitet wird (Emerson & Miyake, 2003). Aus diesem Grund sind Bryck und Mayr (2005) von der *paper-pencil* zu einer computerisierten Version übergegangen. Allerdings war es dadurch wiederum nicht möglich, die Ergebnisse produzieren zu lassen, da die Versuchspersonen nicht gleichzeitig das Ergebnis aussprechen und artikulatorische Unterdrückung ausüben können. Deshalb wurde die Produktionsaufgabe in eine Verifikationsaufgabe umgewandelt. Beispielsweise wurden Aufgaben der Art 5 – 1 = 6 präsentiert, und per Tastendruck sollte die Richtigkeit der Gleichung angegeben werden. In der geblockten Bedingung wurden entweder Additions- oder Subtraktionsaufgaben präsentiert. In der alternierenden Bedingung wurden Additions- und Subtraktionsaufgaben im Wechsel vorgegeben. Eine weitere Variation in diesem Experiment bestand in der Präsentation bzw. Nicht-Präsentation der Operationszeichen. Die entsprechenden Zweitaufgaben waren erneut artikulatorische Unterdrückung (*the* wiederholen) und *foot tapping*. Obwohl die Effekte der artikulatorischen Unterdrückung geringer ausfielen, unterschied sich das Ergebnismuster in den Blöcken, in denen die Operationszeichen nicht präsentiert wurden nur geringfügig von den bisher berichteten. Ein Effekt der Zweitaufgabenbedingung auf die Wechselkosten ließ sich in der Bedingung mit Operationszeichen nicht nachweisen.

Miyake et al. (2004) untersuchten die Rolle der subvokalen Sprache im sog. *random task cueing paradigm*. In diesem Experiment wurde stets ein ungefülltes Dreieck oder ein ungefüllter Kreis vor einem grün oder rot gefüllten Quadrat präsentiert. Vor jedem Durchgang gab ein Aufgaben-Cue an, ob die Farbe des Quadrates (rot vs. grün) oder die Form der Reizanordnung (Kreis vs. Dreieck) beurteilt werden soll. Dabei wurde die Aufgabenstellung entweder mit einem Wort-Cue (SHAPE vs. COLOR) oder einem Buchstaben-Cue (S vs. C) ausgedrückt. Parallel zur Erstaufgabe sollten die Versuchspersonen entweder das Wort „Dienstag“ im Takt eines Metronoms wiederholen (artikulatorische Unterdrückung) oder aber sie sollten den Takt des Metronoms mit dem Fuß klopfen (*foot tapping*). Selbstverständlich gab es eine Kontrollbedingung ohne Zweitaufgabe. Verglichen wurden die Reaktionszeiten aufeinander folgender Durchgänge, in denen der Cue – und damit die Aufgabe – wiederholt wurde, mit Reaktionszeiten aufeinander folgender Durchgänge, in denen die Aufgabe wechselte. Die Reaktionszeitdifferenz aus Aufgabenwechsel und Aufgabenwiederholung diente als Maß der Wechselkosten. Bei Präsentation des Wort-Cues wirkte sich das Ausführen einer Zweitaufgabe nicht auf die Wechselkosten aus. Bestand der Cue jedoch nur aus einem Buchstaben, so entstanden höhere Wechselkosten bei artikulatorischer Unterdrückung im Vergleich zum *foot tapping* bzw. der Bedingung ohne Zweitaufgabe. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass der Buchstaben-Cue zunächst explizit in die Aufgabeninstruktion umformuliert werden muss, was durch artikulatorische Unterdrückung erschwert wird. Die übereinstimmenden Wechselkosten der *foot tapping*- und Kontrollbedingung belegen diesen spezifischen Einfluss der artikulatorischen Unterdrückung.

Baddeley et al. (2001) nehmen an, dass es möglich ist, „that participants subvocalize a verbal sequence such as „plus, minus, plus, minus“, and so forth, using this as a simple but effective action plan“ (S. 645). Emerson und Miyake (2003) beschreiben subvokale Sprache im Kontext des Aufgabenwechsels als Strategie der verbalen Selbstinstruktion, bei der sich die Versuchspersonen durch innerliches Aufsagen der Operation auf den nächsten Durchgang vorbereiten. Die Ergebnisse zum Aufgabenwechsel weisen darauf hin, dass diese subvokale Sprache durch artikulatorische

Unterdrückung gestört werden kann. Dabei kann der Effekt der artikulatorischen Unterdrückung nicht per se auf die Bearbeitung einer Zweitaufgabe zurückgeführt werden. In den meisten oben angeführten Untersuchungen unterschieden sich die Ergebnisse zum *foot tapping* nicht bedeutsam von der Kontrollbedingung ohne Zweitaufgabe. Weiterhin konnte wiederholt gezeigt werden, dass sich artikulatorische Unterdrückung und *foot tapping* (oder ähnliche Aufgaben) in ihrer allgemeinen Aufgabenschwierigkeit kaum unterscheiden (Baddeley et al., 2001; Emerson & Miyake, 2003; Miyake et al., 2004). Dieser spezifische Einfluss der artikulatorischen Unterdrückung auf die verbale Selbstinstruktion soll im Folgenden für die Unterscheidung zwischen der Strategieannahme und der Interferenzannahme herangezogen werden.

Fasst man die Strategieanwendung bei negativen Zahlenpaaren als Selbstinstruktion auf, dann sollte es möglich sein, diese Selbstinstruktion durch artikulatorische Unterdrückung zu stören. Dies sollte bei negativen Zahlenpaaren einen Anstieg der Reaktionszeiten im Vergleich zu einer Kontrollbedingung oder aber einer Zweitaufgabe ohne verbalen Anteil zur Folge haben. Bei positiven Zahlen sollten sich hingegen keine Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und der Bedingung mit artikulatorischer Unterdrückung ergeben. Mit der Strategieannahme wird folglich eine Interaktion zwischen Art des Zahlenpaares und Art der Zweitaufgabe vorhergesagt.

Gilt hingegen die Interferenzannahme, so existiert bei negativen Zahlen eine Interferenz zwischen der subjektiven (absolut numerischen) und der objektiven (numerischen) Größe der Zahlen. Artikulatorische Unterdrückung sollte sich nicht auf diese Interferenz und somit nicht unterschiedlich auf die Reaktionszeiten positiver und negativer Zahlenpaare auswirken. Diese Hypothese basiert auf den Ergebnissen eines Experiments von Saeki (2007), die den Größenkongruenzeffekt in Abhängigkeit von artikulatorischer Unterdrückung untersuchte. Aus zwei präsentierten Zahlen unterschiedlicher physikalischer Größe sollte jeweils die numerisch größere Zahl ausgewählt werden. Dabei gab es die drei schon mehrfach beschriebenen Zweitaufgabenbedingungen: keine, artikulatorische Unterdrückung und *foot tapping*. Das für diese Untersuchung entscheidende Ergebnis lautet, dass der Größenkongruenzeffekt nicht durch die Art der Zweitaufgabe moduliert wurde. Die Versuchspersonen benötigten zwar in der *foot tapping*-Bedingung bzw. artikulatorischen Bedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung zur Bearbeitung der Zahlenpaare insgesamt mehr Zeit, die Art der Zweitaufgabe interagierte jedoch nicht mit dem Größenkongruenzeffekt. Übertragen auf die Interferenzannahme könnte dies bedeuten, dass die erhöhten Reaktionszeiten für negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren, für die ja gerade die Interferenz zwischen subjektiver und numerischer Größe verantwortlich gemacht wird, nicht durch artikulatorische Unterdrückung beeinflusst werden. Dies führt zur Vorhersage, dass eine Interaktion zwischen der Art des Zahlenpaares und der Art der Zweitaufgabe ausbleibt.

In dem nun folgenden Experiment 6 wird auf die Darbietung gemischter Zahlenpaare verzichtet. Die Ergebnisse der gemischten Zahlenpaare aus Experiment 5 zum Größenkongruenzeffekt deuten darauf hin, dass weniger ein Vergleich der numerischen Größe der beiden Zahlen als vielmehr eine Kategorisierung nach Plus- und Minuszeichen stattfindet. Die gemischten Zahlenpaare liefern deshalb keinen Beitrag zur Beantwortung der zentralen Fragestellung. Das Auslassen gemischter Zahlenpaare bringt zudem mit sich, dass sich die Anzahl der Stimuluspaare von 288 auf 144 (72 negative und 72 positive) reduziert. Damit wird das Reizmaterial halbiert, was die Anzahl der Durchgänge bzw. Sitzungen verkürzt.

4.6.2 Methode

Versuchspersonen Für das Experiment konnten acht Studierende der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg gewonnen werden, von denen keiner an den bisherigen Experimenten teilgenommen hatte. Das Alter der einen männlichen und sieben weiblichen Versuchspersonen lag zwischen 18 und 29 Jahren (M = 22 Jahre, SD = 4 Jahre).

Aufgabe In jedem Durchgang wurde ein positives oder negatives Zahlenpaar präsentiert und die Aufgabe lautete, so schnell wie möglich die numerisch größere Zahl auszuwählen. Die Antwortabgabe erfolgte entweder per Tastendruck oder verbal. Diese Primäraufgabe wurde mit oder ohne Zweitaufgabe ausgeführt. Die Zweitaufgabe bestand darin, entweder im Takt eines Metronoms sinnlose Silben "ba-bi, ba-bi ...“ zu wiederholen (artikulatorische Unterdrückung) oder aber den Takt des Metronoms mit dem Fuß zu klopfen (*foot tapping*).

Stimuli Es wurden alle 144 positiven und negativen Zahlenpaare im Bereich $[-9,\ldots,-1,1,\ldots,9]$ präsentiert, keines der Zahlenpaare enthielt zwei gleiche absolute Zahlen. Die Zahlenpaare wurden als schwarze Symbole auf weißem Grund dargeboten, positive Zahlen wurden mit einem Pluszeichen versehen.

Versuchsdurchführung Alle Versuchspersonen absolvierten sieben Sitzungen in einem Zeitraum von max. zwei Wochen. Die erste Sitzung galt als Übungssitzung und unterscheidet sich von den restlichen Sitzungen darin, dass kein Metronomrhythmus vorgegeben wurde und keine Zweitaufgabe ausgeführt werden sollte. Die Realisierung der Zweitaufgabenbedingung erfolgte in den Sitzungen 2–7, wobei sich jede dieser Bedingungen über zwei aufeinander folgende Sitzungen erstreckte. In der Bedingung *artikulatorische Unterdrückung* wurde die Versuchsperson instruiert, parallel zur numerischen Vergleichsaufgabe im Rhythmus des Metronoms sinnlose Silben (z. B. „babi“, „boba“, „bibo“ etc.) aufzusagen. In jedem Block wurde eine andere Silbenkombination vorgegeben. Pro Metronomschlag sollte eine Silbe wiederholt werden. In der numerischen Vergleichsaufgabe wurden die Antworten per Tastendruck abgegeben. In der Bedingung *foot tapping* sollte der Rhythmus des Metronoms mit dem bevorzugten Fuß geklopft werden. Die Antworten auf die Zahlenpaare erfolgten in dieser Bedingung verbal[9]. Dabei sollte die Versuchsperson „links“ sagen, wenn die linke Zahl die numerisch größere der beiden Zahlen darstellte. Im anderen Fall sollte „rechts“ gesagt werden. In der *Kontrollbedingung* wurde keine Zweitaufgabe von den Versuchspersonen abverlangt, die Reaktion wurde über den Reaktionstaster abgegeben. Um den Geräuschpegel jedoch in allen drei Bedingungen konstant zu halten, war das Metronom eingeschaltet.

Pro Sitzung absolvierte jede Versuchsperson zwölf Blöcke mit $3+60$ Durchgängen, die ersten drei Durchgänge eines jeden Blocks dienten als *warm-up*. In Sitzungen mit Zweitaufgabe wurde zu Beginn der Sitzung das Metronom eingeschaltet und die Versuchsperson übte die entsprechende Zweitaufgabe. Zwischen den einzelnen Blöcken gab es jeweils eine Pause von mindestens 30 s, in denen der Metronomrhythmus nicht abgespielt wurde. Den Beginn eines Durchganges markierte

[9] Es könnte der Einwand hervorgebracht werden, dass das unterschiedliche Antwortformat die Vergleichbarkeit der drei Zweitaufgabenbedingungen einschränkt. Dessen ist sich die Autorin bewusst. Allerdings hätte die Antwortabgabe per Tastendruck in der Bedingung *foot tapping* eine Synchronisierung des Fußklopfens mit dem Tastendrücken verursachen können, weshalb die verbale Antwortabgabe ausgewählt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass sich das unterschiedliche Antwortformat lediglich auf die Gesamtreaktionszeiten auswirkt.

für 500 ms ein Rechteck mit einem Sehwinkel von 3.7° (horizontal) × 1.9° (vertikal) bei einem Betrachtungsabstand von ca. 65 cm. Nach weiteren 400 ms wurde das Zahlenpaar innerhalb des Darstellungsbereiches des Rechtecks dargeboten. Das Zahlenpaar war bis zur Reaktion der Versuchsperson auf dem Bildschirm sichtbar. Nach einem variablen ITI von 1000–1500 ms folgte der nächste Durchgang. Die Zahlen wurden in einer Größe von 1.3 (horizontal) × 1 cm (vertikal) dargestellt. Dies entspricht einem Sehwinkel von 1.1° horizontal und 0.9° vertikal.

Der Versuchsleiter war während der Sitzungen 2–7 anwesend. Führte die Versuchsperson die Zweitaufgabe nicht im Takt des Metronoms aus, so wurde sie vom Versuchsleiter durch das Wort „Takt!“ darauf aufmerksam gemacht. Erfolgte die Beantwortung der Zahlenpaare entgegen der Instruktion im Takt des Metronoms, so wurde die Versuchsperson instruiert, eine Synchronisierung der Primär- und Sekundäraufgabe zu vermeiden.

Versuchsplan Die linke und rechte Zahl des Zahlenpaares bildeten zwei unabhängige Variablen in diesem Experiment. Die unabhängige Variable Zweitaufgabe wies drei Stufen auf: keine Zweitaufgabe, artikulatorische Unterdrückung sowie *foot tapping*. Pro Sitzung wurde jedes Zahlenpaar fünfmal dargeboten, womit sich in jeder Zweitaufgabenbedingung zehn Replikationen pro Zahlenpaar ergaben. Es handelte sich bei allen genannten Variablen um Messwiederholungsfaktoren. Als abhängige Variablen wurden wie gewohnt Reaktionszeiten und Fehlerraten erfasst.

Geräte Die verwendete Apparatur entsprach der aus Experiment 4. Der Metronomrhythmus wurde als wav-Datei eingespielt und auf eine Rate von 80 Schlägen pro Minute (1 Hz) gesetzt. In der Kontrollbedingung sowie der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung wurde die Reaktionszeit wie gewohnt mit dem Reaktionstaster erfasst. In der *foot tapping*-Bedingung erfolgte die Reaktionszeitmessung über ein an einen Stimmschlüssel angeschlossenes Mikrofon, das die Reaktionszeitmessung triggerte. Die Empfindlichkeit des Stimmschlüssels wurde zu Beginn der entsprechenden Sitzungen individuell angepasst.

4.6.3 Ergebnisse

4.6.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

In einem ersten Auswertungsschritt wurde von den sieben absolvierten Sitzungen jeder Versuchsperson die erste Sitzung als Übung definiert. Damit sollte gewährleistet werden, dass die Versuchspersonen zum einen mit der Aufgabe vertraut waren und zum anderen das mögliche Verwenden von Strategien in der ersten Sitzung etabliert werden konnte. In die Datenauswertung gehen somit nur die Sitzungen 2–7 ein. Es wurden *trimmed means* über die zehn Replikationen pro Zahlenpaar und Zweitaufgabenbedingung berechnet.

In einem zweiten Auswertungsschritt wurde die Reaktionszeitdifferenz zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren pro Sitzung betrachtet. Das Experiment war so programmiert, dass ausgehend vom ersten Wertungsdurchgang des ersten Blocks einer Sitzung in 144 aufeinander folgenden Durchgängen jedes Zahlenpaar genau einmal präsentiert wurde. Aus diesem Grund kann man alle 720 Wertungsdurchgänge einer Sitzung in fünf Replikationsblöcke unterteilen. Pro Replikationsblock wurden sodann *trimmed means* pro Art des Zahlenpaares berechnet, d. h. man erhält pro Sitzung fünf *trimmed means* für negative Zahlenpaare und fünf *trimmed means* für positive Zahlenpaare.

Die Gesamtfehlerrate in diesem Experiment kann mit einem Wert von .061 als gering bezeichnet werden. In den einzelnen Zweitaufgabenbedingungen lagen die mittleren relativen Fehlerhäufigkeiten bei .055, .061 und .067 für die Bedingungen Kontrolle, artikulatorische Unterdrückung und *foot tapping*. Die höheren Fehlerraten in der Bedingung *foot tapping* kommen zustande, da nicht nur falsche Antworten der Versuchsperson als Fehler gewertet wurden, sondern auch solche Durchgänge, in denen andere Antworten (z. B. „äh“) abgegeben wurden oder das *voicekey* nicht anschlug. Die relativen Fehlerhäufigkeiten bei positiven (.062) und negativen Zahlenpaaren (.061) sind vergleichbar.

Zur Überprüfung des Vorliegens eines *speed-accuracy tradeoff* wurden für die 72 positiven bzw. negativen Zahlenpaare in den drei Zweitaufgabenbedingungen Korrelationen zwischen mittleren Reaktionszeiten und relativen Fehlerhäufigkeiten berechnet. Aus Tabelle 4.19 geht hervor, dass es sowohl für negative wie auch für positive Zahlenpaare in allen drei Zweitaufgabenbedingungen signifikant positive Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und den relativen Fehlerhäufigkeiten gibt. Ein *speed-accuracy tradeoff* liegt demzufolge nicht vor.

Tabelle 4.19

Korrelationen (r) zwischen den mittleren Reaktionszeiten und den relativen Fehlerhäufigkeiten und zugehörige Irrtumswahrscheinlichkeiten (p), getrennt nach Art des Zahlenpaares und Zweitaufgabenbedingung

	Art des Zahlenpaares					
	negativ			positiv		
	K	AS	FT	K	AS	FT
r	.625	.776	.535	.684	.7	.436
p	<.0005	<.0005	<.0005	<.0005	<.0005	<.0005

Anmerkung. K = Kontrolle, AS = *articulatory suppression*, FT = *foot tapping*.

4.6.3.2 Die Wirkung artikulatorischer Unterdrückung

Der für dieses Experiment interessante Einfluss der Zweitaufgabenbedingung auf den Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Diese Abbildung lässt deutlich erkennen, dass zusätzliches Produzieren sinnloser Silben nicht zu größeren Reaktionszeiten führt: Sowohl in der Kontrollbedingung wie auch in der Bedingung artikulatorische Unterdrückung liegt ein Reaktionszeitmittelwert von 447 ms vor. Allerdings steigt die mittlere Reaktionszeit in der *foot tapping*-Bedingung auf einen Wert von 611 ms an. Dieser Reaktionszeitunterschied von 164 ms kann darauf zurückgeführt werden, dass die verbalen Antworten in dieser Bedingung mittels *voicekey* erfasst wurden. Weiterhin zeigt Abbildung 4.21, dass der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren gering ist, er beträgt im Mittel nur 17 ms.

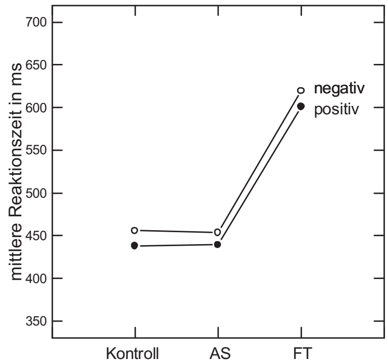


Abbildung 4.21. Mittlere Reaktionszeiten für negative und positive Zahlenpaare in den drei Zweitaufgabenbedingungen (AS = *articulatory suppression*, FT = *foot tapping*).

Die Durchführung einer dreifaktoriellen Varianzanalyse mit den drei Messwiederholungsfaktoren Zweitaufgabenbedingung (Kontroll, AS, FT), Art des Zahlenpaares (positiv vs. negativ) und numerische Differenz ($d = 1, \ldots, d = 8$) bestätigt den visuellen Eindruck aus Abbildung 4.21. Der Haupteffekt Art des Zahlenpaares erreicht mit $F_{1,7} = 2.84$ und $p = .136$ keine Signifikanz. In diesem Experiment sind Versuchspersonen durchaus in der Lage, auf negative und positive Zahlenpaare gleich schnell zu reagieren. Der Haupteffekt Zweitaufgabenbedingung wird aufgrund der höheren Reaktionszeiten in der *foot tapping*-Bedingung mit $F_{2,14} = 46.585$ und $p < .0005$ signifikant. Die Interaktion Art des Zahlenpaares × Zweitaufgabenbedingung ($F_{2,14} = 0.573$, $p = .577$) verfehlt das Signifikanzniveau. In den drei Zweitaufgabenbedingungen Kontrolle, AS und FT beträgt die Reaktionszeitdifferenz zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren 18 ms, 15 ms bzw. 19 ms. Obwohl die Reaktionszeitdifferenz verschwindet, zeigt Abbildung 4.22 dennoch sehr deutlich, dass der numerische Distanzeffekt davon unbeeinflusst bleibt. Der Haupteffekt numerische Differenz wird mit $F_{7,49} = 52.953$ ($p < .0005$ nach GG) erwartungsgemäß signifikant. Des Weiteren verfehlen die Interaktionen numerische Differenz × Art des Vorzeichens ($F_{7,49} = 2.31$, $p = .096$ nach GG) und numerische Differenz × Zweitaufgabenbedingung ($F_{14,98} = 2.077$, $p = .11$ nach GG) sowie die Dreifachinteraktion ($F_{14,98} = 1.84$, $p = .152$ nach GG) das Signifikanzniveau.

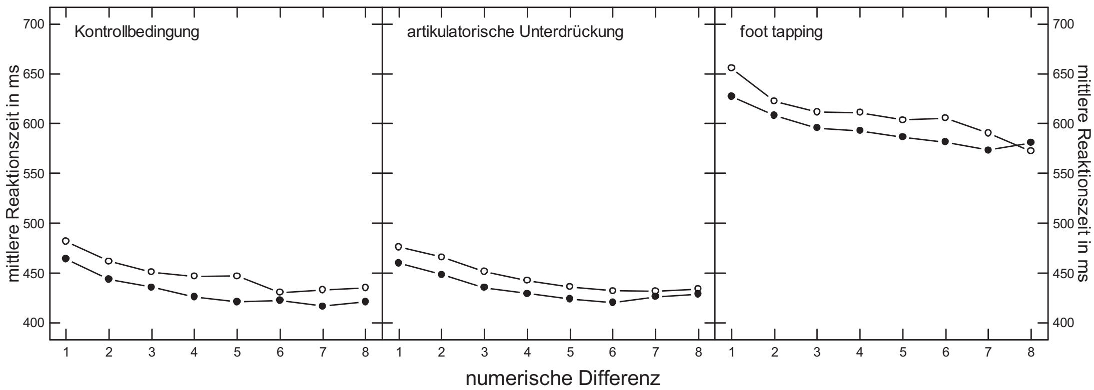


Abbildung 4.22. Der numerische Distanzeffekt für negative (ungefüllte Kreise) und positive Zahlenpaare (gefüllte Kreise) in den drei Zweitaufgabenbedingungen.

Auch wenn damit auf die Diskussion vorgegriffen wird, muss dem unerwarteten Ergebnis des Ausbleibens eines Reaktionszeitunterschiedes zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren an dieser Stelle weiter nachgegangen werden. Dazu soll zunächst die Betrachtung der individuellen Reaktionszeitunterschiede[10] hilfreich sein, die Tabelle 4.20 wiedergibt. Dabei entsprechen negativen Werten kürzere Reaktionszeiten auf negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren.

Tabelle 4.20

Mittlere Reaktionszeitdifferenzen zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren für die drei Zweitaufgabenbedingungen (K = Kontrolle, AS = articulatory suppression, FT = foot tapping) pro Versuchsperson; negative Werte stehen für schnellere Reaktionen auf negative Zahlenpaare

	Versuchsperson							
	1	2	3	4	5	6	7	8
K	−7	11	8	11	52	54	20	−7
AS	−20	−3	−3	26	63	28	24	−1
FT	−26	22	6	7	71	37	22	12

Auffällig ist, dass es Versuchspersonen (Vpn 1, 2, 3 und 8) gibt, die auf negative Zahlenpaare schnellere Reaktionen abgeben als auf positive Zahlenpaare. Versuchsperson 1 beantwortet in allen drei Zweitaufgabenbedingungen negative Zahlenpaare schneller als positive Zahlenpaare. Auf der anderen Seite gibt es zwei Versuchspersonen (Vpn 5 und 6), die über alle Zweitaufgabenbedingungen hinweg ausgeprägte Reaktionszeitvorteile zugunsten der positiven Zahlenpaare aufweisen.

In Abbildung 4.23 wurden die fünf Replikationsblöcke der ersten Sitzung dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren bei fünf Versuchspersonen (Vpn 1, 2, 3, 7 und 8) schon in dieser ersten Sitzung – teilweise sogar im zweiten oder dritten Replikationsblock – gegen Null läuft. Versuchspersonen 5 und 6 liefern Reaktionszeitdifferenzen von 217 ms bzw. 299 ms im ersten Replikationsblock, welche mit 60 ms bzw. 114 ms auch im letzten Replikationsblock der ersten Sitzung bestehen bleiben. Ein Blick in Tabelle 4.20 bestätigt ein weiteres Mal, dass gerade diese beiden Versuchspersonen über alle drei Zweitaufgabenbedingungen große Reaktionszeitunterschiede aufweisen.

4.6.3.3 Der semantische Kongruenzeffekt

Das Ausbleiben des Reaktionszeitunterschiedes zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren ermöglicht nun zusätzlich die Betrachtung des semantischen Kongruenzeffekts (vgl. Abschnitt 2.1), der einen Aufschluss über die Verwendung von Strategien bei Präsentation negativer Zahlenpaare liefern kann. Dieser beinhaltet die Beobachtung, dass aus zwei numerisch kleinen Zahlen schneller die numerisch kleinere und aus zwei numerisch großen Zahlen schneller die numerisch größere Zahl ausgewählt werden kann. Aus diesem Grund wurde die Summe der Absolutbeträge beider Zahlen eines Zahlenpaares getrennt für negative und positive Zahlenpaare gebildet. Für die

[10] Die Auswertung der individuellen Daten beschränkt sich auf die deskriptive Analyse.

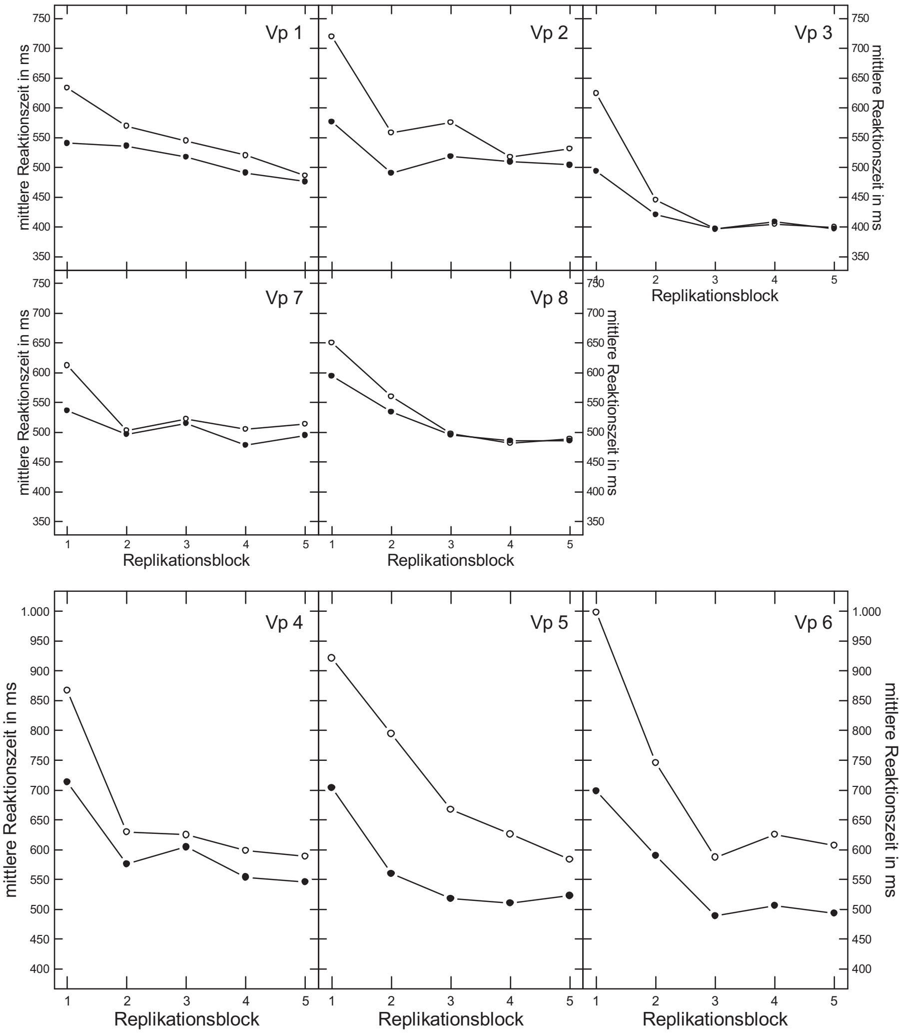
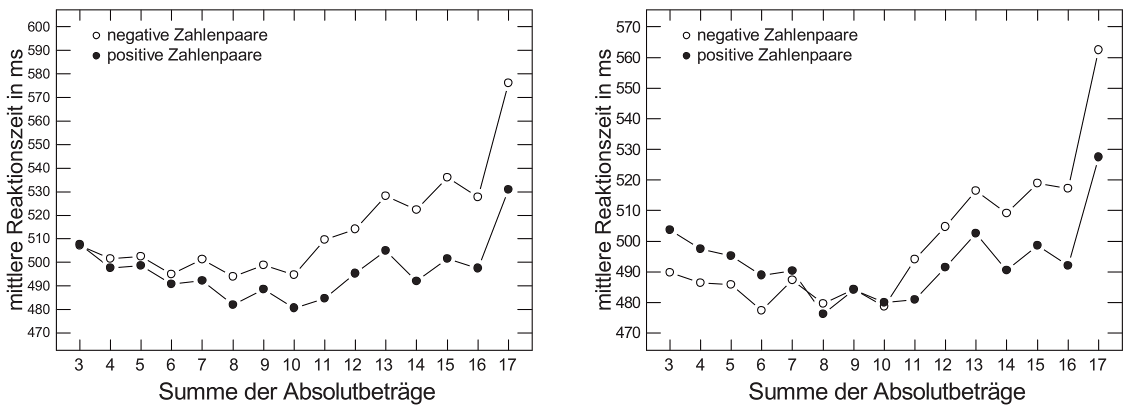


Abbildung 4.23. Mittlere Reaktionszeiten für negative (ungefüllte Kreise) und positive Zahlenpaare (gefüllte Kreise) pro Versuchsperson für die fünf Replikationsblöcke der ersten Sitzung.

Zahlenpaare 4 9 sowie 7 6 würde man jeweils die Summe 13 erhalten. Gleichermaßen nimmt der Absolutbetrag der Summe des Zahlenpaares −6 −7 den Wert 13 an. Abbildung 4.24a liefert einen ersten Hinweis darauf, dass der Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten und der Summe nicht unabhängig von der Art des Zahlenpaares ist. Vielmehr geht daraus hervor, dass die Reaktionszeitdifferenz zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren für numerisch kleine Werte der Summen verschwindend gering ist und mit Ansteigen der Summe der beiden Zahlen zunimmt. Allerdings gehen in diese Abbildung auch die Daten jener zwei Versuchspersonen ein, die im Mittel Reaktionszeitunterschiede von 62 ms (für Vp 5) bzw. 40 ms (für Vp 6) erzeugten. Es erscheint daher sinnvoll, sich den semantischen Kongruenzeffekt ohne Reaktionszeiten dieser beiden Versuchspersonen anzuschauen. Abbildung 4.24b liefert ein äußerst interessantes Ergebnis. Ohne Einbeziehung der Mittelwerte von Versuchspersonen 5 und 6 verschiebt sich der Reaktionszeitverlauf der negativen Zahlenpaare nach unten und kreuzt somit den Reaktionszeitverlauf der positiven Zahlenpaare. Ergibt die Summe beider Zahlen eines Zahlenpaares einen Wert < 7, so erfolgt die Reaktion schneller auf negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren. Ab einer Summe > 10 kehrt sich dieser Effekt um: Die Antworten können schneller auf positive im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren abgegeben werden. Zur Überprüfung dieses Zusammenhanges wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den beiden Faktoren Art des Zahlenpaares (positiv vs. negativ) und Summe $(3, \ldots, 17)$ gerechnet. Die Reaktionszeiten der Versuchspersonen 5 und 6 wurden von der Analyse ausgeschlossen. Während der Haupteffekt Zahlenpaarart mit $F_{1,5} = 0.941$ und $p = .376$ das Signifikanzniveau verfehlt, werden der Haupteffekt Summe ($F_{14,70} = 10.948$, $p = .003$ nach GG) sowie die Interaktion zwischen der Zahlenpaarart und der Summe ($F_{14,70} = 3.281$, $p = .043$) auf dem 5%-Niveau signifikant.



(a) Mit Berücksichtigung der Daten der Versuchspersonen 5 und 6.

(b) Ohne Berücksichtigung der Daten der Versuchspersonen 5 und 6.

Abbildung 4.24. Mittlere Reaktionszeiten für negative und positive Zahlenpaare in Abhängigkeit von der Summe der Absolutbeträge der beiden Zahlen eines Zahlenpaares.

Selbstverständlich könnte zum in Abbildung 4.24b dargestellten semantischen Kongruenzeffekt der Einwand lauten, dass die Summe der beiden Zahlen mit der numerischen Differenz konfundiert ist. Bezogen auf positive Zahlenpaare gehen in die Summe 3 nur die beiden möglichen Zahlenpaare 1 2 bzw. 2 1 ein. Zur Summe 10 hingegen tragen weitaus mehr Zahlenpaare bei (1 9, 9 1, 2 8, 8 2, 3 7, 7 3, 4 6, 6 4). Während die Summe 3 somit nur Zahlenpaare mit einer numerischen Differenz von $d = 1$ enthält, kann die Summe 10 aus den numerischen Differenzen $d = 2$, $d = 4$, $d = 6$ und $d = 8$ gebildet werden. Sehr kleine bzw. sehr große Summen gehen demnach nur mit sehr kleinen numerischen Differenzen einher, während Summen im mittleren Bereich aus vielen unterschiedlichen numerischen Differenzen erstellt werden können. Dies führte zur Darstellung des semantischen Kongruenzeffekts getrennt für die acht numerischen Differenzen in Abbildung 4.25. Im linken oberen Teil dieser Abbildung ist der semantische Kongruenzeffekt für die numerische Differenz $d = 1$ dargestellt. Diese Abbildung spiegelt größtenteils das eben berichtete Ergebnis wider. Bilden die Absolutbeträge der beiden Zahlen eine numerisch kleine Summe (z. B. 3, 4), so erfolgt die Reaktion schneller, wenn der Summe ein negatives im Vergleich zu einem positiven Zahlenpaar zugrunde liegt. Umgekehrt werden kürzere Reaktionszeiten produziert, wenn große Summen (z. B. 16, 17) durch positive im Vergleich zu negativen Zahlen zustande kommen.

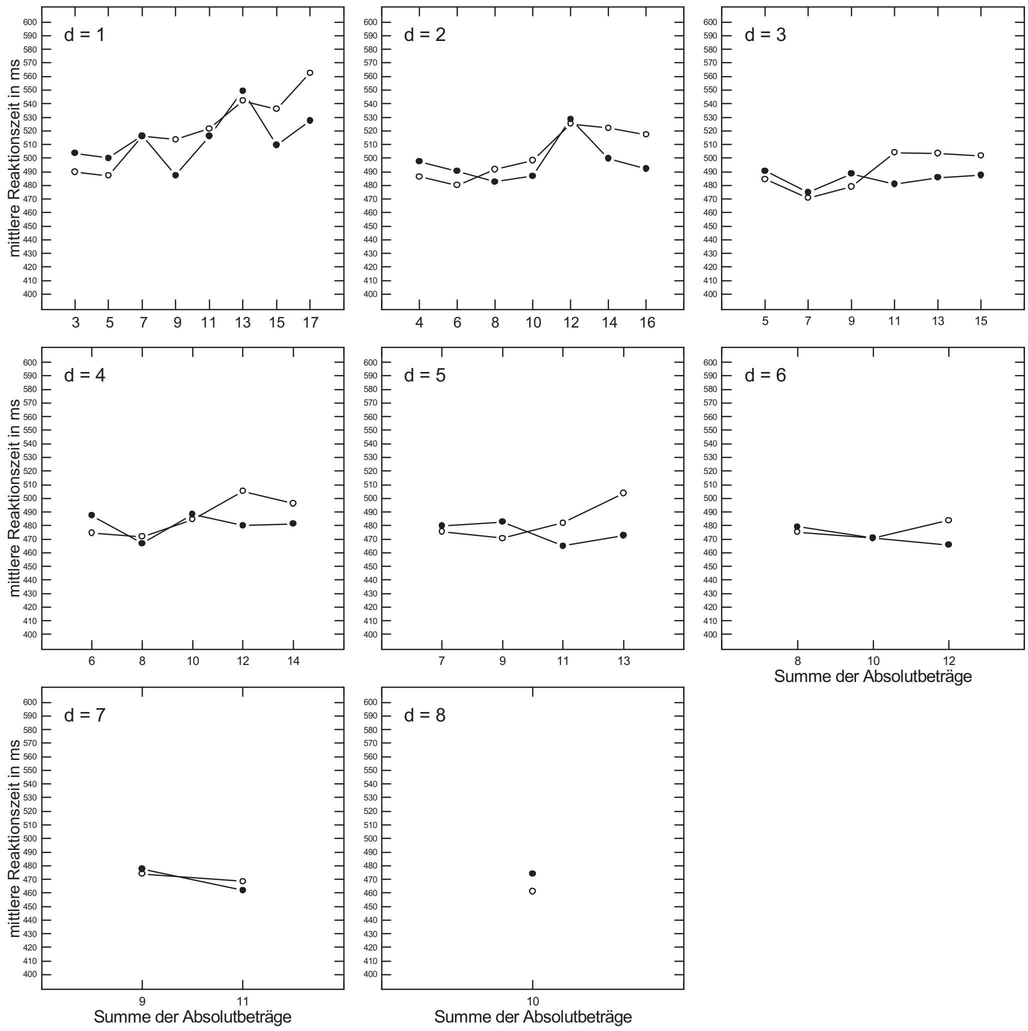


Abbildung 4.25. Mittlere Reaktionszeiten für negative (ungefüllte Kreise) und positive Zahlenpaare (gefüllte Kreise) in Abhängigkeit von der Summe der Absolutbeträge der beiden Zahlen eines Zahlenpaares, getrennt für die numerischen Differenzen d = 1 bis d = 8 (Darstellung ohne Daten von Versuchspersonen 5 und 6).

Abbildung 4.25 soll zudem veranschaulichen, dass der semantische Kongruenzeffekt nicht durch Mittelung über alle numerischen Differenzen hinweg entsteht. Vielmehr zeigt sich der Effekt deskriptiv auch für die numerischen Differenzen d = 2, d = 3, d = 4 und d = 5. Für die numerischen Differenzen d = 6, d = 7 und d = 8 ist der Zusammenhang nicht mehr so deutlich, da diese nur Zahlenpaare mit einer großen numerischen Differenz beinhalten. Die zugrunde liegende Idee des semantischen Kongruenzeffekts ist aber gerade, dass das entsprechende Zahlenpaar zwei numerisch kleine bzw. zwei numerisch große Zahlen enthält. In jeder dieser Abbildungen ist auffällig, dass die Reaktionszeiten mit Zunahme der Summe der Absolutbeträge ansteigen, was auf den numerischen Größeneffekt (vgl. Abschnitt 2.1) zurückzuführen ist. Das erklärt auch, weshalb die mittleren Reaktionszeiten für negative und positive Zahlenpaare in den Abbildungen 4.24a und 4.24b mit Zunahme der Summe ansteigen.

4.6.4 Diskussion

Obgleich das Experiment durchgeführt wurde, um möglichen Strategien bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare mittels artikulatorischer Unterdrückung nachzugehen, wird artikulatorische Unterdrückung nachfolgend nur geringfügig diskutiert. Die Art der Zweitaufgabe (keine, AS, FT) wirkte sich nicht auf den Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren aus. Die nicht-signifikante Interaktion könnte als Bestätigung der Interferenzannahme angesehen werden. Diese Schlussfolgerung würde jedoch einen deutlichen Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren voraussetzen. Dieser essentielle Reaktionszeitunterschied sank in diesem Experiment unerwartet auf ein nicht-signifikantes Niveau. Dadurch ist die Möglichkeit, aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Art des Vorzeichens und der Art der Zweitaufgabe zwischen der Zahlenstrahl- und der Strategieannahme zu unterscheiden, nicht mehr gegeben.

Bei fünf von acht Versuchspersonen verschwand der Reaktionszeitunterschied innerhalb der ersten Sitzung. Dieses Ergebnis ist deshalb überraschend, weil der Reaktionszeitunterschied in Experiment 5 zum Größenkongruenzeffekt sowie im Experiment von Lochmann (2005) charakteristisch war. In Experiment 5 konnte der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren in jeder der elf Sitzungen bei jeder der zwölf Versuchspersonen festgestellt werden. In vergleichbarer Weise lag der Reaktionszeitunterschied im Experiment von Lochmann über sieben Sitzungen hinweg bei zwölf Versuchspersonen vor. In demselben Maße erhielt Fischer (2003) nach zehn Replikationen pro Zahlenpaar einen Reaktionszeitvorteil der positiven gegenüber den negativen Zahlenpaaren von 81 ms. Auch Shaki und Petrusic (2005) berichten eine ähnliche Ausprägung der Reaktionszeitdifferenz. Worin könnte also der Grund dafür zu finden sein, dass Versuchspersonen in diesem Experiment auf positive und negative Zahlenpaare im Mittel gleich schnell reagieren können? Der Hauptunterschied zu Experiment 5 liegt darin, dass in diesem Experiment auf die Verwendung gemischter Zahlenpaare verzichtet wurde, da diese nicht zur Unterscheidung der beiden konkurrierenden Annahmen beitragen. Im Experiment von Fischer waren gemischte Zahlenpaare Bestandteil des Stimulusmaterials. Shaki und Petrusic boten zwar keine gemischten Zahlenpaare dar, variierten allerdings die Instruktion, da sie am SNARC-Effekt interessiert waren. Dies führt zur Annahme, dass in der Präsentation gemischter Zahlenpaare die Ursache für den Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren zu finden ist. Im Anschluss an dieses Experiment wird deshalb ein Kontrollexperiment beschrieben, das dieser Vermutung nachgeht.

Auch wenn momentan nicht beantwortet werden kann, inwieweit gemischte Zahlenpaare zum Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren beitragen, können die Ergebnisse hinsichtlich der zwei Modellannahmen diskutiert werden. Für diese Betrachtung wird ausschließlich der semantische Kongruenzeffekt herangezogen. Unter Berücksichtigung der Daten aller acht Versuchspersonen verkleinerte sich der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren, je kleiner die Summe der Absolutbeträge der beiden Zahlen eines Zahlenpaares war (vgl. Abbildung 4.24a). Ein noch deutlicheres Bild des Zusammenhangs zwischen der mittleren Reaktionszeit und der Summe der Absolutbeträge entstand ohne die Daten der Versuchspersonen 5 und 6 (vgl. Abbildung 4.24b). Auf alle Summen > 10 erfolgte die Beantwortung positiver Zahlenpaare schneller als die negativer. Hingegen konnte auf alle Summen < 7 schneller auf negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren geantwortet werden. Dieses Ergebnis bedeutet zugleich, dass auf negative Zahlenpaare mit zwei numerisch großen Zahlen (z. B. −1 −2) schneller geantwortet werden kann als auf zwei numerisch kleine positive Zahlen (z. B. 2 1). Genau diese Vorhersage würde der semantische Kongruenzeffekt treffen: Die numerisch größere Zahl kann schneller aus zwei numerisch großen als zwei numerisch kleinen Zahlen ausgewählt werden. Liefert dieses Ergebnis zum semantischen Kongruenzeffekt somit einen Beleg für die Ausweitung des mentalen Zahlenstrahls in den negativen Zahlenbereich? In Kombination mit den Ergebnissen aus Experiment 5 zum Größenkongruenzeffekt kann diese Frage verneint werden. Mit den Ergebnissen aus Experiment 5 konnte eindeutig belegt werden, dass numerisch große negative Zahlen (z. B. −1, −2) keineswegs als ‚große' Zahlen angesehen werden. Dies führte zur Erweiterung der Zahlenstrahlannahme und Postulierung der Interferenzannahme, die die Repräsentation der absolut numerischen Größe auf dem mentalen Zahlenstrahl vorsieht und von einer Interferenz zwischen der subjektiven (absolut numerischen) und der objektiven (numerischen) Größe einer Zahl ausgeht. Entscheidend ist nun, dass es bei negativen Zahlenpaaren, die eine kleine Summe der Absolutbeträge aufweisen, keine Übereinstimmung der subjektiven Größe (in diesem Fall: klein) und der Instruktion („Wähle die numerisch größere Zahl") gibt. Die gleiche Überlegung trifft auf die positiven Zahlen mit numerisch kleinen Summen zu. Somit dürfte sich bei Gültigkeit der Interferenzannahme keinesfalls ein Reaktionszeitvorteil der negativen gegenüber den positiven Zahlen mit kleinen Summen der Absolutbeträge ergeben. Die Interferenzannahme würde stets einen Nachteil der Beantwortung negativer Zahlenpaare vorhersagen.

Im Gegensatz dazu resultiert aus dem Ergebnis zum semantischen Kongruenzeffekt eine gute Möglichkeit, die beiden Strategiehypothesen voneinander abzugrenzen. Würden die Versuchspersonen innerhalb der negativen Zahlenpaare zunächst die absolut größere Zahl auswählen und dann die andere Taste drücken (Annahme der Reaktionsumkehr), dürfte der Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren nicht verschwinden, da das „Umentscheiden" eine konstante Zeit beansprucht, die mit Übung zwar kleiner, aber nie Null oder gar negativ werden dürfte. Mit dieser Annahme würden stets parallele Verläufe negativer im Vergleich zu positiven Zahlen vorhergesagt werden. Die Strategie der Instruktionsumkehr, bei negativen Zahlen anstelle der numerisch größeren die absolut kleinere Zahl auszuwählen, ist hingegen durchaus in der Lage, die Ergebnisse zum semantischen Kongruenzeffekt zu erklären. Für Summen > 10 ergaben sich kürzere Reaktionszeiten für positive im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren. Aus zwei absolut großen Zahlen (z. B. −9 −8) die absolut kleinere Zahl auszuwählen, beanspruchte mehr Zeit, als aus zwei numerisch großen Zahlen (z. B. 9 8) die numerisch größere Zahl zu bestimmen. In gleicher Weise können die kürzeren Reaktionszeiten auf negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren für Summen < 7 erklärt werden. Die absolut kleinere zweier absolut kleiner Zahlen (z. B. −1 −2) kann schneller bestimmt werden als die numerisch größere zweier numerisch kleiner Zahlen (z. B. 1 2). Im Übrigen steht die Anwendung dieser Strategie mit den von Versuchspersonen berichteten Strategien zur Entscheidungsfindung bei negativen Zahlenpaaren in Einklang. Entsprechend berichtet der Großteil der Versuchspersonen, bei einem negativen Zahlenpaar die absolut kleinere der beiden Zahlen ausgewählt zu haben.

Nun könnte der Einwand hervorgebracht werden, dass bisher mit der Strategie der Instruktionsumkehr die langsameren Reaktionen auf negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren erklärt wurden. Trotz Ausbleibens des Reaktionszeitunterschiedes wurde dieselbe Strategie gerade eben zur Erklärung der Ergebnisse zum semantischen Kongruenzeffekt angeführt. Die Annahme, die Umkehr der Instruktion würde stets zu höheren Reaktionszeiten führen, kann mit den hier erhaltenen Ergebnissen nicht länger beibehalten werden. Das Ausbleiben des Reaktionszeitunterschiedes trotz Anwendung der Strategie der Instruktionsumkehr könnte schlicht und einfach darauf zurückzuführen sein, dass keine gemischten Zahlenpaare präsentiert wurden und nur eine Instruktion vom Versuchsleiter vorgegeben war. Dadurch konnten die Vorzeichen verlässlich als Instruktionscues genutzt und deren Anwendung entsprechend geübt werden. Die Verwendung der Vorzeichen beider Zahlenpaararten als Instruktionscues könnte die Versuchspersonen veranlasst haben, bei Präsentation zweier Minuszeichen die absolut kleinere Zahl, bei Präsentation zweier Pluszeichen die numerisch größere Zahl auszuwählen. Die Vorgehensweise wäre bei beiden Zahlenpaararten identisch und ein zeitlicher Nachteil bei der Bearbeitung negativer Zahlen nicht mehr plausibel. Zur Begründung soll folgendes gedankliche Experiment hilfreich sein. Ähnlich dem vorliegenden Experiment 6 werden positive und negative Zahlenpaare dargeboten, denen entsprechend Plus- bzw. Minuszeichen vorangestellt sind. Die Versuchsperson wird nun konkret instruiert, die Vorzeichen als Instruktionscue und alle präsentierten Zahlen (auch die negativen!) als positive Zahlen aufzufassen. Ferner wird sie instruiert, dass die dargebotenen Plus- und Minuszeichen angeben, die numerisch größere oder numerisch kleinere Zahl des Zahlenpaares zu bestimmen. Sind den beiden Zahlen Pluszeichen vorangestellt, soll die numerisch größere Zahl ausgewählt werden. Umgekehrt erfordern zwei Minuszeichen die Auswahl der numerisch kleineren Zahl. Mit diesem Experiment würde man keinen Unterschied der Reaktionszeiten für die beiden Instruktionen erwarten. Vielmehr sollte sich so zeigen lassen, dass die Vorzeichen als Instruktionscues genutzt werden können. Eben dieses Vorgehen könnten die Versuchspersonen von Experiment 6 angewendet haben. Zwei Pluszeichen entsprachen der Aufgabe, die numerisch größere Zahl des Zahlenpaares auszuwählen, zwei Minuszeichen standen für die Auswahl der absolut kleineren Zahl. Da in beiden Fällen, d. h. bei positiven und negativen Zahlenpaaren, zunächst die Vorzeichen in eine entsprechende Instruktion umgewandelt werden mussten, unterscheidet sich deren Verarbeitung nicht mehr, wodurch sich der ausbleibende Reaktionszeitunterschied erklären lässt.

Letztlich gilt noch zu klären, weshalb es hinsichtlich der Gesamtreaktionszeiten keinen Unterschied zwischen der Kontrollbedingung und der artikulatorischen Unterdrückung gab. Offensichtlich führte das zusätzlich zum numerischen Vergleich ausgeübte Produzieren sinnloser Silbenkombinationen nicht zum Ansteigen der Reaktionszeiten. Als Grund dafür könnte angeführt werden, dass der Abruf der Instruktion mittels Vorzeichen im Laufe des Experiments automatisierte. Somit konnten sich die Versuchspersonen auf die Vorzeichen einstellen und die entsprechende Instruktion abrufen. Jede Versuchsperson absolvierte zunächst eine Übungssitzung, in der keine Zweitaufgabe abverlangt wurde und das Metronom auch nicht eingeschaltet war. Möglicherweise genügte diese Sitzung der Mehrzahl der Versuchspersonen, die Vorzeichen ohne aktives Verbalisieren als Instruktionscues zu verwenden.

4.7 Experiment 7: Kontrollexperiment zum Einfluss der gemischten Zahlenpaare

4.7.1 Fragestellung

Das Experiment 6 zu *inner speech* lieferte ein Ergebnis, das in allen bisher durchgeführten Experimenten so noch nicht gefunden wurde: Auf negative und positive Zahlenpaare konnte von der Mehrzahl der Versuchspersonen im Mittel gleich schnell reagiert werden. Diesem Ergebnis soll in einem Kontrollexperiment nachgegangen werden. Der Unterschied zwischen Experiment 6 und Experiment 5 dieser Arbeit bestand lediglich darin, dass keine gemischten Zahlenpaare präsentiert wurden, da diese nicht zur Beantwortung der zentralen Fragestellung beitragen. So konnte der numerische Distanzeffekt, der als robuster Effekt des numerischen Größenvergleiches gilt (Poltrock, 1989), nur unter Berücksichtigung der numerischen Kongruenz gezeigt werden (Exp. 5). Mit Ausschluss der gemischten Zahlenpaare reduzierte sich weiterhin die Menge der Zahlenpaare – und damit die Anzahl der Durchgänge – um die Hälfte, da von den 288 möglichen Zahlenpaaren im Bereich $[-9,\dots,-1,1,\dots,9]$ die Hälfte der Zahlenpaare zu den gemischten Zahlenpaaren gehört. In dem Kontrollexperiment soll exploratorisch überprüft werden, ob der Reaktionszeitunterschied durch die gemischten Zahlenpaare zustande kommt. Das Experiment besteht aus zwei Sitzungen, die sich in der Präsentation bzw. Nicht-Präsentation gemischter Zahlenpaare unterscheiden. Ist der Reaktionszeitunterschied vom Auftreten gemischter Zahlenpaare abhängig, so sollte er in der Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren auftreten, in der Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare hingegen nicht.

4.7.2 Methode

Versuchspersonen Insgesamt nahmen 14 Versuchspersonen an dem Experiment teil, deren Alter zwischen 19 und 30 Jahren ($M = 24$ Jahre, $SD = 5$ Jahre) lag. Eine Versuchsperson hatte schon an Experiment 5 teilgenommen. Die Teilnahme an dem Experiment wurde mit zwei Versuchspersonenstunden vergütet oder galt als Studienleistung im Rahmen des Experimentalpsychologischen Praktikums.

Aufgabe Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand in beiden Sitzungen darin, die numerisch größere zweier präsentierter Zahlen per Tastendruck auszuwählen.

Stimuli Verwendet wurden alle 288 positiven, negativen und gemischten Zahlenpaare im Bereich $[-9,\dots,-1,1,\dots,9]$, die dem Absolutbetrag nach keine zwei gleichen Zahlen enthalten. Die Zahlen wurde als schwarze Symbole auf weißem Grund dargeboten, positive Zahlen wurden mit einem Pluszeichen versehen.

Versuchsdurchführung Jede Versuchsperson absolvierte insgesamt zwei Sitzungen. In einer der beiden Sitzungen wurden lediglich alle 72 negativen und 72 positiven Zahlenpaare dargeboten. Jedes Zahlenpaar wurde viermal repliziert. Die sich so ergebenden 576 Zahlenpaare wurden auf acht Blöcke mit je $3 + 72$ Durchgängen aufgeteilt. In zwei aufeinander folgenden Blöcken wurde jedes Zahlenpaar genau einmal dargeboten. In der anderen Sitzung wurden zusätzlich zu den negativen und positiven Zahlenpaaren gemischte Zahlenpaare präsentiert. Da es gleich viele gemischte wie positive und negative Zahlenpaare gibt und alle Zahlenpaare viermal repliziert wurden, mussten in dieser Sitzung genau doppelt so viele Durchgänge (1152) absolviert werden, die auf 16 Blöcke à $3+72$ Durchgänge aufgeteilt wurden. In dieser Sitzung wurde jedes Zahlenpaar in vier aufeinander folgenden Blöcken genau einmal dargeboten.

Der Ablauf eines Durchgangs stimmte in beiden Sitzungen überein. Den Beginn eines Durchgangs kennzeichnete ein Rechteck, das für 500 ms dargeboten wurde. Nach weiteren 400 ms erschien das Zahlenpaar, welches mit der Reaktion der Versuchsperson durch das Drücken einer von zwei Tasten verschwand. Das variable ITI lag im Bereich 1000–1500 ms. Die Größe des Rechtecks sowie der Zahlen wurde aus Experiment 6 übernommen. Von den 14 rekrutierten Versuchspersonen bekamen sieben in der ersten Sitzung gemischte Zahlenpaare präsentiert. Die restlichen sieben Versuchspersonen bearbeiteten in der ersten Sitzung keine gemischten Zahlenpaare. Die Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare dauerte ca. 30 min, die Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren wurde in ca. 60 min absolviert.

Versuchsplan Da in diesem Experiment nur der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren interessiert, ergeben sich vier unabhängige Variablen. Dabei handelt es sich um die drei *within-subjects* Variablen Art des Zahlenpaares (negativ vs. positiv), Nummer der Sitzung (1. Sitzung vs. 2. Sitzung) und Replikationsblock (1–4) sowie die *between-subjects* Variable Reihenfolge der Sitzungen (gemischte Zahlenpaare in der 1. Sitzung vs. gemischte Zahlenpaare in der 2. Sitzung).

Geräte Die verwendeten Geräte sind identisch zu denen aus Experiment 6.

4.7.3 Ergebnisse

4.7.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

Da in diesem Experiment der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren bedeutsam war, erfolgte die *trimmed mean*-Berechnung pro Sitzung, Replikationsblock und Art des Zahlenpaares (negativ, positiv, gemischt). Mit Replikationsblock sind in der Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren vier, in der Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare zwei aufeinander folgende Blöcke gemeint, in denen jedes der 288 bzw. 144 Zahlenpaare genau einmal präsentiert wurde. Somit erhält man für jede Sitzungsart vier Replikationsblöcke, was zu 72 Beobachtungen pro *trimmed mean* für die negativen und positiven sowie 144 Beobachtungen pro *trimmed mean* für die gemischten Zahlenpaare führt.

Die relativen Fehlerhäufigkeiten lauten in der Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren für die negativen, positiven und gemischten Zahlenpaare: .075, .048 und .023. Die mittlere Fehlerrate der negativen Zahlenpaare weist im Vergleich zu den positiven Zahlenpaaren einen höheren Wert auf. In der Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare beträgt die relative Fehlerhäufigkeit bei den negativen Zahlenpaaren .051 und bei den positiven Zahlenpaaren .044.

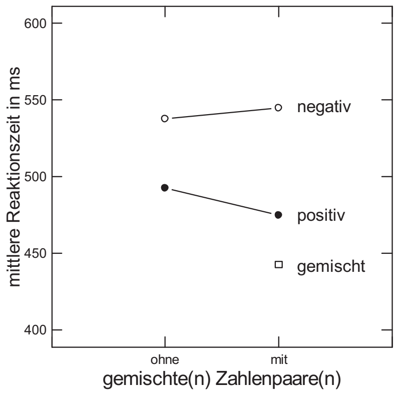


Abbildung 4.26. Mittlere Reaktionszeiten für negative, positive und gemischte Zahlenpaare für die beiden Sitzungsarten.

4.7.3.2 Der Einfluss der gemischten Zahlenpaare

Erneut soll die graphische Darstellung des entscheidenden Sachverhalts einen ersten Einblick in die Ergebnisse liefern. Abbildung 4.26 gibt die mittleren Reaktionszeiten negativer, positiver und gemischter Zahlenpaare für die beiden Sitzungen wieder. Auch in diesem Experiment kann auf gemischte Zahlenpaare mit 443 ms schneller reagiert werden als auf positive (484 ms) oder negative Zahlenpaare (541 ms). Weiterhin fällt auf, dass der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren in der Sitzung, in der auch gemischte Zahlenpaare präsentiert wurden, größer ist (71 ms) als in der Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare (45 ms). Obwohl es sich lediglich um eine Reaktionszeitdifferenz von 26 ms handelt, kann dieser Zusammenhang bei 13 von 14 Versuchspersonen beobachtet werden. Die Ab- bzw. Zunahme des Reaktionszeitunterschiedes zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren für die beiden Sitzungsreihenfolgen verdeutlicht Tabelle 4.21.

Tabelle 4.21

Mittlere Reaktionszeiten und mittlere Reaktionszeitdifferenzen (Δ) für negative und positive Zahlenpaare pro Sitzungsart getrennt für die beiden Sitzungsreihenfolgen (alle Angaben in ms)

	gemischte Zahlenpaare			
	präs.	¬ präs.	¬ präs.	präs.
Sitzung	1	2	1	2
positiv	476	444	541	473
negativ	558	493	582	532
Δ	82	49	41	59

Obwohl es in jeder Sitzung nur vier Replikationen pro Zahlenpaar gab, verkleinerte sich der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren von 82 ms auf 49 ms, wenn in der zweiten Sitzung keine gemischten Zahlenpaare präsentiert wurden. Umgekehrt vergrößerte sich der Reaktionszeitunterschied von 41 ms auf 59 ms, wenn gemischte Zahlenpaare in der zweiten Sitzung zusätzlich dargeboten wurden. Diese Reaktionszeitdifferenzen wurden inferenzstatistisch mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit den beiden Faktoren Sitzungsreihenfolge (Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren zuerst vs. Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare zuerst) und Nummer der Sitzung (erste vs. zweite) ausgewertet. Der Haupteffekt Sitzungsreihenfolge wird nicht signifikant ($F_{1,12} = 1.464$, $p = .25$). Die Reaktionszeitdifferenz zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren unterschied sich im Mittel nicht zwischen den beiden Versuchsgruppen (gemischte Zahlenpaare in der 1. Sitzung: $\Delta = 66$ ms; gemischte Zahlenpaare in der 2. Sitzung: $\Delta = 50$ ms). Des Weiteren ist die Reaktionszeitdifferenz nicht von der Sitzungsnummer abhängig, was mit dem nicht-signifikanten Haupteffekt Sitzungsnummer zum Ausdruck kommt ($F_{1,12} = 1.639$, $p = .225$). In der ersten Sitzung liegt im Mittel eine Reaktionszeitdifferenz von 62 ms vor, in der 2. Sitzung beträgt diese 54 ms. Umso bedeutsamer ist jedoch die signifikante Interaktion Sitzungsreihenfolge × Sitzungsnummer, die mit $F_{1,12} = 18.621$ und $p = .001$ den Beitrag der gemischten Zahlenpaare am Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren bestätigt. Mit separaten t-Tests wurde zusätzlich überprüft, inwieweit die Reaktionszeitdifferenzen der 1. und 2. Sitzung voneinander verschieden sind. Wurden gemischte Zahlenpaare in der 1. Sitzung dargeboten (vgl. linker Teil von Tabelle 4.21), so unterschieden sich die Reaktionszeitdifferenzen der ersten (82 ms) und zweiten Sitzung (49 ms) signifikant voneinander ($t_6 = 4.078$, $p = .007$). Wurden gemischte Zahlenpaare hingegen erst in der zweiten Sitzung dargeboten (41 ms vs. 59 ms; vgl. rechter Teil von Tabelle 4.21), liefert der t-Test einen entsprechenden t-Wert von -2.086, der das Signifikanzniveau knapp verfehlt ($p = .082$). Ein Grund für die Nicht-Signifikanz des t-Tests könnte darin liegen, dass in die Reaktionszeitdifferenz die Mittelwerte der vier Replikationsblöcke einfließen. In diesen Mittelwert gehen demzufolge auch die Reaktionszeiten aus den ersten Blöcken einer jeden Versuchsperson ein, die in allen anderen Experimenten als Übung definiert wurden. Die mittlere Reaktionszeitdifferenz sank von 68 ms im ersten Replikationsblock auf 51 ms, 32 ms bzw. 16 ms im zweiten, dritten und vierten Replikationsblock, wenn in der ersten Sitzung keine gemischten Zahlenpaare präsentiert wurden. Umgekehrt stieg die Reaktionszeitdifferenz in der zweiten Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren auf 62 ms an, blieb dann aber mit 58 ms, 52 ms bzw. 64 ms für die Replikationsblöcke 2–4 relativ stabil. Bei den Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung alle drei Zahlenpaararten bearbeiteten, verringerte sich die Reaktionszeitdifferenz von 104 ms im ersten Replikationsblock auf 77 ms, 69 ms und 75 ms für die Replikationsblöcke 2–4. In der zweiten Sitzung ohne Präsentation gemischter Zahlenpaare sank die Reaktionszeitdifferenz zunächst auf 55 ms ab und blieb dann mit 48 ms, 43 ms und 49 ms für die Replikationsblöcke 2–4 relativ unverändert.

Es ist nun nahe liegend, sich den Übergang von der ersten zur zweiten Sitzung genauer anzuschauen. Hierzu wurde der vierte Replikationsblock der 1. Sitzung dem ersten Replikationsblock der 2. Sitzung für die beiden Sitzungsreihenfolgen gegenübergestellt. Der linke Teil von Abbildung 4.27 gibt den Übergang von der 1. zur 2. Sitzung für die Versuchspersonengruppe wieder, die in der 1. Sitzung gemischte Zahlenpaare beantworten musste. Der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren nimmt dabei von der 1. zur 2. Sitzung von 75 ms auf 55 ms ab. Diese Differenz der Reaktionszeitunterschiede wird mittels t-Test für abhängige Stichproben nicht signifikant ($t_6 = 1.633$, $p = .154$). Im rechten Teil von Abbildung 4.27 sind die mittleren Reaktionszeiten der Versuchspersonen wiedergegeben, die in der ersten Sitzung nur positive und negative Zahlenpaare bearbeiteten und erst in der zweiten Sitzung zusätzlich gemischte

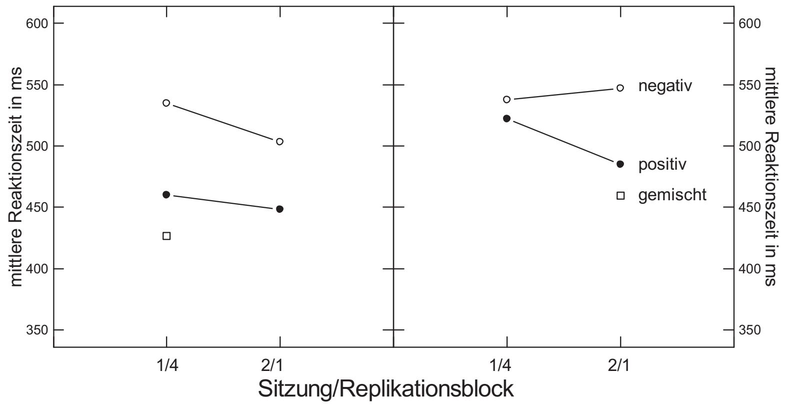


Abbildung 4.27. Mittlere Reaktionszeiten für den vierten Replikationsblock der 1. Sitzung und den ersten Replikationsblock der 2. Sitzung für negative, positive und gemischte Zahlenpaare. Links: Präsentation gemischter Zahlenpaare in der 1. Sitzung, rechts: Präsentation gemischter Zahlenpaare in der 2. Sitzung.

Zahlenpaare präsentiert bekamen. Es ist zu erkennen, dass der Reaktionszeitunterschied im vierten Block der 1. Sitzung einen Wert von 16 ms annimmt, um dann im ersten Replikationsblock der 2. Sitzung auf einen Wert von 62 ms anzusteigen. Dieses Ergebnis hebt den Einfluss der gemischten Zahlenpaare auf den Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren hervor. Mit $t_6 = -3.981$ und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = .007$ erreicht dieser Unterschied statistische Signifikanz.

4.7.4 Diskussion

Mittels dieses Kontrollexperiments sollte der Einfluss der gemischten Zahlenpaare auf den Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren überprüft werden. Dazu absolvierte jede Versuchsperson zwei Sitzungen, wobei in einer der beiden Sitzungen zusätzlich zu positiven und negativen Zahlenpaaren gemischte Zahlenpaare präsentiert wurden. Wurden die gemischten Zahlenpaare in der ersten Sitzung dargeboten, so verkleinerte sich die Reaktionszeitdifferenz von der ersten zur zweiten Sitzung. Da die Versuchspersonen gleichzeitig in der zweiten Sitzung schneller wurden, könnte dies als gewöhnlicher Übungseffekt erklärt werden. Absolvierten die Versuchspersonen allerdings zuerst die Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare und danach die Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren, dann stieg der Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren von der ersten zur zweiten Sitzung an.

Zusätzlich wurde der Einfluss der gemischten Zahlenpaare gezielt anhand des Übergangs von der ersten zur zweiten Sitzung betrachtet. Dazu wurde der vierte Replikationsblock der ersten Sitzung dem ersten Replikationsblock der zweiten Sitzung gegenübergestellt. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, dass das alleinige Präsentieren positiver und negativer Zahlenpaare in der zweiten Sitzung dazu führte, dass sich der Reaktionszeitunterschied im Vergleich zur ersten Sitzung (mit gemischten Zahlenpaaren) um 20 ms verringerte. Umgekehrt stieg der Reaktionszeitunterschied signifikant um 46 ms von der vierten Replikation der ersten Sitzung, in der nur positive und negative Zahlenpaare präsentiert wurden zur 1. Replikation der zweiten Sitzung, in der gemischte

Zahlenpaare hinzugefügt wurden, an.

Wie auch schon in der Einleitung zu diesem Experiment beschrieben, war dieses Experiment exploratorischer Natur. Natürlich könnte argumentiert werden, dass jede Versuchsperson nur zwei Sitzungen absolvierte und jedes Zahlenpaar in jeder Bedingung nur viermal repliziert wurde. Möglicherweise würde der Reaktionszeitunterschied auch mit Darbietung gemischter Zahlenpaare nach entsprechender Übung auf ein nicht signifikantes Niveau absinken. Diesem Argument können die Ergebnisse aus Experiment 5 zum Größenkongruenzeffekt entgegengebracht werden, in welchem zwölf Versuchspersonen insgesamt elf Sitzungen absolvierten, wobei der Reaktionszeitunterschied bei keiner Versuchsperson im Laufe des Experiments verschwand. Somit kann Übung als Einflussfaktor weitestgehend ausgeschlossen werden. Allerdings bleibt offen, ob die gemischten Zahlenpaare auch dann zu einem Ansteigen der Reaktionszeitdifferenz führen, wenn mit jeder Versuchsperson so viele Sitzungen (ohne Darbietung gemischter Zahlenpaare) durchgeführt werden, bis sich die Reaktionszeiten positiver und negativer Zahlenpaare auf einem stabilen Niveau nicht mehr signifikant voneinander unterscheiden. Dieser Frage müssen zukünftige Untersuchungen weiter nachgehen.

Dennoch liefert dieses Kontrollexperiment einen ersten Beleg für die Annahme, dass die Präsentation gemischter Zahlenpaare für die zusätzliche Zeit bei der Beantwortung negativer im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren verantwortlich ist. Allerdings wirft genau dieses Ergebnis vor dem Hintergrund der bisherigen Ergebnisse einige Fragen auf. Insbesondere der signifikante Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren aus Experiment 5 muss in diesem Zusammenhang in Frage gestellt werden, da dieser durch die Präsentation gemischter Zahlenpaare entstanden sein kann. Da Experiment 5 jedoch dazu diente, den Größenkongruenzeffekt zu untersuchen, für den der Reaktionszeitunterschied unbedeutend war, können alle Aussagen und Interpretationen aus Experiment 5 beibehalten werden. Die besondere Stellung der gemischten Zahlenpaare wurde jedoch auch schon in Experiment 5 aufgezeigt. Einerseits kann der numerische Distanzeffekt mit gemischten Zahlenpaaren nur dann gezeigt werden, wenn die numerische Kongruenz berücksichtigt wird. Andererseits deuten die Ergebnisse daraufhin, dass die Entscheidung, welche der beiden Zahlen eines gemischten Zahlenpaares die numerisch größere ist, aufgrund der Vorzeichen getroffen wird. Konkret bedeutet dies unter der Instruktion, die numerisch größere Zahl per Tastendruck zu bestimmen, die Seite mit dem Pluszeichen auszuwählen. Bei positiven und negativen Zahlenpaaren ist die Verarbeitung der numerischen Größe zwingend erforderlich, da die Aufgabe andernfalls nicht gelöst werden kann. Wenn man der Annahme folgt, dass sich die Verarbeitung positiver und negativer im Vergleich zu gemischten Zahlenpaaren unterscheidet, so verwundert der Einfluss der gemischten Zahlenpaare auf den Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren umso mehr. Möglicherweise liegt die Antwort auf diese Frage in der unterschiedlichen Entscheidungshäufigkeit für Zahlen, die mit einem Pluszeichen versehen sind. Werden alle 288 Zahlenpaare im Bereich $[-9,\ldots,-1,1,\ldots,9]$ präsentiert, so gibt es 72 positive, 72 negative und 144 gemischte Zahlenpaare, d. h. genau die Hälfte der Zahlenpaare enthält eine negative und eine positive Zahl. Darüber hinaus entscheidet sich die Versuchsperson aufgrund der Instruktion bei allen positiven und gemischten Zahlenpaaren, d. h. in 75 % der Fälle, für eine Zahl mit einem Pluszeichen. Umgekehrt soll nur in 25 % der Fälle – nämlich bei allen negativen Zahlenpaaren – eine Zahl mit einem Minuszeichen ausgewählt werden. Bei allen gemischten Zahlenpaaren muss sich die Versuchsperson sogar aktiv gegen die Zahl mit dem Minuszeichen entscheiden. Dies könnte dazu führen, dass auf Zahlen mit Pluszeichen schneller bzw.

auf Zahlen mit einem Minuszeichen langsamer reagiert werden kann.

Dieser Überlegung könnte mit einem geeigneten Experiment nachgegangen werden. Jede Versuchsperson müsste wieder jeweils eine Sitzung mit und eine Sitzung ohne gemischte Zahlenpaare absolvieren. Die Instruktion müsste nun jedoch lauten, die numerisch kleinere der beiden Zahlen per Tastendruck auszuwählen. Diese Instruktion würde zur Folge haben, dass die Entscheidung in 75 % der Fälle für die Zahl mit dem Minuszeichen getroffen wird, da nun bei gemischten Zahlenpaaren die Zahl mit dem Minuszeichen gewählt werden müsste. Als Ergebnis könnte man vermuten, dass sich der Reaktionszeitunterschied zugunsten der negativen Zahlenpaare umkehrt, d. h. in der zweiten Sitzung mit gemischten Zahlenpaaren sollte die Reaktion auf negative Zahlenpaare schneller erfolgen als auf positive Zahlenpaare.

4.8 Experiment 8: Die Selbstinstruktion – II

4.8.1 Fragestellung

Für die Untersuchung der möglichen Selbstinstruktion bei der Bearbeitung negativer Zahlenpaare erwies sich Experiment 6 als ungeeignet, da der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren bei fünf von acht Versuchspersonen schon innerhalb der ersten Sitzung verschwand. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Vorzeichen der beiden Zahlen als Instruktionscues verwendet wurden. Folglich führten die beiden Minuszeichen eines negativen Zahlenpaares zur Auswahl der absolut kleineren Zahl, die beiden Pluszeichen eines positiven Zahlenpaares hingegen zur Auswahl der numerisch größeren Zahl. Bei beiden Zahlenpaararten dienten die Vorzeichen als verlässliche Instruktionscues, die im Laufe des Experiments automatisch zum Abruf der entsprechenden Instruktion führten. Für das automatische Abrufen der Instruktion spricht, dass die Gesamtreaktionszeiten in der Kontrollbedingung im Vergleich zu artikulatorischer Unterdrückung nicht verschieden voneinander waren. Versuchspersonen benötigten nicht mehr Zeit zur Beantwortung positiver und negativer Zahlenpaare, wenn parallel zum numerischen Vergleich das Aufsagen sinnloser Silbenkombinationen abverlangt wurde.

Die Idee der *inner speech* bei negativen Zahlenpaaren soll dennoch nicht verworfen werden. Es muss lediglich eine experimentelle Situation geschaffen werden, die einen Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren zur Folge hat. Diese experimentelle Situation ergibt sich, wenn die Instruktion, die numerisch größere bzw. kleinere Zahl auszuwählen, innerhalb eines Blocks zufällig variiert wird (Shaki & Petrusic, 2005).

Aufgrund dessen wird Experiment 6 in seiner Grundidee wiederholt, wobei zusätzlich zu Beginn eines Durchgangs die Instruktion durch einen Aufgabencue angegeben wird. Diese Variation der Instruktion gewährleistet bei den negativen Zahlenpaaren, dass die in Experiment 6 eventuell angewandte Strategie, in jedem Durchgang mit negativen Zahlenpaaren zuverlässig die absolut kleinere Zahl auszuwählen, nicht mehr verwendet werden kann. Vielmehr muss die Strategie in jedem Durchgang neu angepasst werden. Wird verlangt, aus einem negativen Zahlenpaar die numerisch größere Zahl auszuwählen, so müsste bei Gültigkeit der Strategieannahme entweder die absolut kleinere Zahl bestimmt werden (Instruktionsumkehr) oder die absolut größere Zahl mit entsprechender Umkehrung der Antwortseite (Reaktionsumkehr). Gibt der Aufgabencue hingegen an, die numerisch kleinere Zahl auszuwählen, so müsste die absolut kleinere mit anschließender Reaktionsumkehr oder die absolut größere Zahl (Instruktionsumkehr) ausgewählt werden. Die bei Präsentation eines negativen Zahlenpaares immer wieder neu anzupassende Strategie sollte einen Anstieg der Reaktionszeiten der negativen im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren zur Folge haben. Gleichzeitig sollte sich artikulatorische Unterdrückung nachteilig auf die Reaktionszeiten negativer Zahlenpaare auswirken, wenn eine der beiden Strategien zur Anwendung kommt. Für die Interferenzannahme ergibt sich die gleiche Vorhersage, die auch schon in Experiment 6 formuliert wurde: Die Reaktionszeitdifferenz zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren sollte in der Bedingung artikulatorische Unterdrückung im Vergleich zur Kontrollbedingung vergleichbar sein. Zusätzlich ermöglicht die Variation der Instruktion die Überprüfung der Vorhersagen der konkurrierenden Annahmen zum semantischen Kongruenzeffekt (siehe Tabelle 2.1).

4.8.2 Methode

Versuchspersonen An dem Experiment nahmen zwölf weibliche Versuchspersonen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg teil, von denen sich eine schon einmal als Versuchsperson (Exp. 2) zur Verfügung gestellt hatte. Das durchschnittliche Alter der Versuchspersonen betrug 22 Jahre (SD = 3 Jahre). Die Teilnahme wurde entweder mit 42,- EUR oder sieben Versuchspersonenstunden vergütet.

Aufgabe Vor der Präsentation des Zahlenpaares erschien ein Aufgabencue, der angab entweder die numerisch größere oder die numerisch kleinere Zahl des Zahlenpaares auszuwählen. Zusätzlich zu dieser numerischen Vergleichsaufgabe wurden die Versuchspersonen in einem Teil der Sitzungen instruiert, eine Zweitaufgabe auszuführen. Im Metronomtakt sollten entweder sinnlose Silbenkombinationen wiederholt werden (artikulatorische Unterdrückung) oder aber der Takt sollte mit dem Fuß geklopft werden (*foot tapping*).

Stimuli Es wurden alle 144 positiven und negativen Zahlenpaare mit linken und rechten Zahlen im Bereich $[-9, \ldots, -1, 1, \ldots, 9]$ präsentiert. Keines der Zahlenpaare enthielt zwei gleiche Zahlen. Die Zahlenpaare wurde als schwarze Symbole auf weißem Grund dargeboten, positive Zahlen wurden mit einem Pluszeichen versehen.

Versuchsdurchführung Ähnlich Experiment 6 absolvierten alle Versuchspersonen sieben Sitzungen in einem Zeitraum von zwei Wochen. Dabei galt die erste Sitzung erneut als Übungssitzung. In den verbleibenden sechs Sitzungen wurde in jeweils zwei aufeinander folgenden Sitzungen eine der drei Zweitaufgabenbedingungen (keine, artikulatorische Unterdrückung, *foot tapping*) realisiert. Mit den drei Zweitaufgabenbedingungen wurde genauso verfahren, wie in Experiment 6 beschrieben. Den einzigen Unterschied zu Experiment 6 bildete die Präsentation eines Aufgabencues zu Beginn eines Durchgangs, der den Hinweisreiz ersetzte. Bei dem Aufgabencue handelte es sich um ein grünes oder rotes ungefülltes Rechteck. Für die Hälfte der Versuchspersonen gab das grüne Rechteck an, die numerisch kleinere Zahl des nachfolgenden Zahlenpaares auszuwählen. Das rote Rechteck entsprach der Instruktion, die numerisch größere Zahl des Zahlenpaares auszuwählen. Für die verbleibenden sechs Versuchspersonen galt die umgekehrte Kombination von Rechteckfarbe und Instruktion. Jedes Zahlenpaar wurde mit jeder Instruktion pro Sitzung zweimal repliziert. Dies ergab 144 (Zahlenpaare) × 2 (Instruktionen) × 2 (Replikationen) = 576 Bedingungen. Eine Sitzung dauerte ca. 45–55 min.

Ein Durchgang wurde durch die Präsentation des Aufgabencues für 500 ms eingeleitet. Nach weiteren 400 ms erschien das Zahlenpaar, das bis zur Antwortabgabe der Versuchsperson sichtbar war. Nach einem variablen ITI von 1000–1500 ms begann der nächste Durchgang. Die Größe der Reize wurde aus Experiment 6 übernommen. Die Größe des Aufgabencues entsprach der Größe des rechteckigen Hinweisreizes aus Experiment 6.

Versuchsplan Der Versuchsplan entspricht weitgehend dem aus Experiment 6. Neben den bekannten unabhängigen Variablen linke Zahl, rechte Zahl und Zweitaufgabenbedingung (keine, artikulatorische Unterdrückung, *foot tapping*) ist auch die Instruktion (numerisch größer vs. numerisch kleiner) als unabhängige Variable anzusehen. Alle bisher genannten Variablen sind Messwiederholungsfaktoren. Weiterhin wird die Variable Reihenfolge der beiden Zweitaufgabenbedingungen Kontrollbedingung und artikulatorische Unterdrückung als unabhängige Variable in den

Versuchsplan aufgenommen. Dabei handelt es sich um eine *between-subjects* Variable. Selbstverständlich wurden die Reaktionszeit bzw. Fehlerrate als abhängige Variablen erfasst.

Geräte Alle verwendeten Geräte sind zu denen aus Experiment 6 identisch.

4.8.3 Ergebnisse

4.8.3.1 Fehlerraten und Datenvorverarbeitung

Die erste Sitzung galt auch in diesem Experiment als Übungssitzung, in der sich die Versuchsperson mit der Zuordnung der Aufgabencues vertraut machen sollte. Sie wird in der Auswertung nicht berücksichtigt. Da jedes Zahlenpaar in jeder Zweitaufgabenbedingung und Instruktion nur viermal repliziert wurde, erfolgte die Berechnung der *trimmed means* über Zahlenpaare mit gleichen Elementen, d. h. über Zahlenpaare mit zwei gleichen Elementen (z. B. 4 9 und 9 4) wird gemittelt. In jeden *trimmed mean* gehen somit acht Beobachtungen pro Zahlenpaarart, Zweitaufgabenbedingung und Instruktion ein.

Das Vorliegen eines *speed-accuracy tradeoff* kann ausgeschlossen werden. Die Korrelationen zwischen den relativen Fehlerhäufigkeiten und den mittleren Reaktionszeiten gibt Tabelle 4.22 wieder.

Tabelle 4.22

Korrelationen (r) zwischen den mittleren Reaktionszeiten und den relativen Fehlerhäufigkeiten und zugehörige Irrtumswahrscheinlichkeiten (p), getrennt nach Art des Zahlenpaares und Zweitaufgabenbedingung. In jede Korrelation gehen 36 positive bzw. negative Zahlenpaare ein.

	Art des Zahlenpaares: negativ			positiv		
	K	AS	FT	K	AS	FT
r	.518	.661	.379	.622	.552	.163
p	.001	<.0005	.023	<.0005	<.0005	.341

Anmerkung. K = Kontrolle, AS = *articulatory suppression*, FT = *foot tapping*.

Die Fehlerrate ist für die positiven Zahlenpaare mit .031 (keine Zweitaufgabe), .047 (artikulatorische Unterdrückung) und .055 (*foot tapping*) als gering zu bewerten. Gleichermaßen ergeben sich für die negativen Zahlenpaare geringe relative Fehlerhäufigkeiten von .041 (Kontrollbedingung), .053 (artikulatorische Unterdrückung) und .061 (*foot tapping*). Es ist erneut auffällig, dass die Fehlerraten in der *foot tapping*-Bedingung sowohl bei positiven als auch bei negativen Zahlenpaaren die höchsten Werte aufweisen. Da das Ergebnis beim *foot tapping* ausgesprochen werden sollte, heben Antworten der Art „äh“ bzw. das Nichtanschlagen des *voicekeys* die Fehlerrate in dieser Bedingung künstlich an.

4.8.3.2 Die Wirkung artikulatorischer Unterdrückung

In diesem Experiment zeigte sich konsistent über alle Versuchspersonen hinweg ein Reaktionszeitvorteil der positiven gegenüber den negativen Zahlenpaaren, der im Mittel 89 ms betrug. Allerdings ließ sich – wie auch schon in Experiment 6 – kein Einfluss der Zweitaufgabenbedingung auf den Reaktionszeitunterschied feststellen. Tabelle 4.23 liefert die entsprechenden mittleren Reaktionszeiten sowie Reaktionszeitdifferenzen.

Tabelle 4.23

Mittlere Reaktionszeiten und Reaktionszeitdifferenzen (in ms) für positive und negative Zahlenpaare in den drei Zweitaufgabenbedingungen

	Zweitaufgabe		
	K	AS	FT
Zahlenpaarart			
positiv	562	608	804
negativ	657	707	878
RTΔ	95	99	74

Anmerkung. K = Kontrolle, AS = *articulatory suppression*, FT = *foot tapping*.

Mittels dreifaktorieller Varianzanalyse wurde die Signifikanz des Reaktionszeitunterschiedes zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren sowie der Einfluss der Zweitaufgabe überprüft. In die Analyse werden die beiden Faktoren Art der Zweitaufgabe (keine, artikulatorische Unterdrückung, *foot tapping*) und Art des Zahlenpaares (negativ vs. positiv) aufgenommen. Zusätzlich geht der Faktor Instruktion („Wähle die numerisch kleinere Zahl“ vs. „Wähle die numerisch größere Zahl“) in die Analyse ein. Die Ergebnisse gibt Tabelle 4.24 wieder. Der Haupteffekt Zweitaufgabenbedingung wird wie erwartet signifikant. Die mittleren Reaktionszeiten in den drei Zweitaufgabenbedingungen lauten 610 ms für die Kontrollbedingung, 658 ms für artikulatorische Unterdrückung und 841 ms für *foot tapping*. Wie erwartet wird auch der Reaktionszeitunterschied von 89 ms zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren signifikant. Die Zweifach-Interaktion der beiden Faktoren Zahlenpaarart und Zweitaufgabe verfehlt hingegen eindeutig das Signifikanzniveau von 5 %. Der Haupteffekt Instruktion wird ebenfalls nicht signifikant. Unter beiden Instruktionen werden mittlere Reaktionszeiten von 703 ms produziert. Allerdings interagiert der Faktor Instruktion signifikant mit der Art des Vorzeichens. Dies äußert sich darin, dass aus zwei positiven Zahlen schneller die numerisch größere und aus zwei negativen Zahlen schneller die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden kann. Auf dieses Ergebnis wird im nachfolgenden Abschnitt intensiver eingegangen. Bedeutsam ist die nicht-signifikante Dreifach-Interaktion Zweitaufgabe × Zahlenpaarart × Instruktion, die belegt, dass sich der in Tabelle 4.23 dargestellte Zusammenhang für die beiden Instruktionen nicht unterscheidet. Der signifikante Haupteffekt Art der Zweitaufgabe sagt noch nichts darüber aus, wodurch die Signifikanz zustande kommt. Zweifellos könnte der Unterschied zwischen *foot tapping* mit 841 ms und der Kontrollbedingung 610 ms dafür verantwortlich sein. Aus Tabelle 4.23 geht jedoch auch hervor, dass sich die mittleren Reaktionszeiten zwischen der Kontrollbedingung (610 ms) und der Bedingung artikulatorische Unterdrückung (658 ms) unter-

Tabelle 4.24

Kennwerte der dreifaktoriellen Varianzanalyse

Effekt	df^*	F	p
Zweitaufgabe (A)	2,22	31.85	<.0005 (GG)
Zahlenpaarart (Z)	1,11	30.548	<.0005
Instruktion (I)	1,11	<.0005	.993
A×Z	2,22	1.198	.321
A× I	2,22	1.372	.274
Z × I	1,11	28.319	<.0005
A×Z × I	2,22	2.874	.108 (GG)

Anmerkung. * Zähler-, Nennerfreiheitsgrade; (GG) Korrektur nach Greenhouse-Geisser.

scheiden. Ein *t*-Test für abhängige Stichproben liefert allerdings für den Reaktionszeitunterschied zwischen der Kontrollbedingung und der Bedingung artikulatorische Unterdrückung ein nicht signifikantes Ergebnis, $t_{11} = 1.596$ und $p = .139$. Zur Aufklärung der nicht-signifikanten Reaktionszeitdifferenz von 48 ms dient Abbildung 4.28.

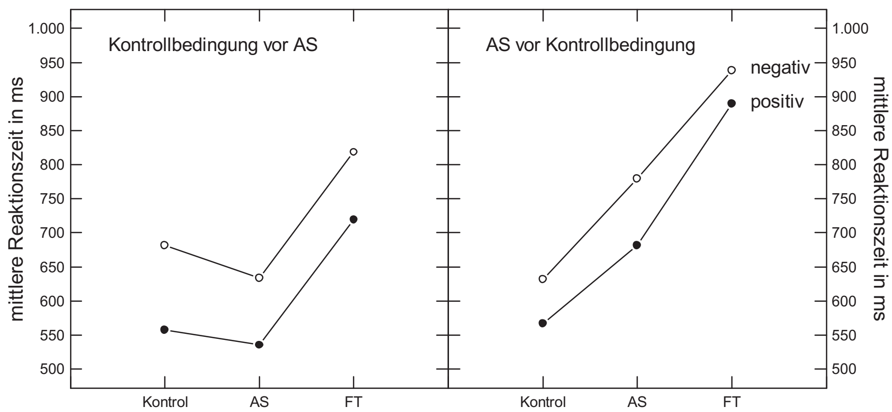


Abbildung 4.28. Mittlere Reaktionszeiten für negative (ungefüllte Kreise) und positive Zahlenpaare (gefüllte Kreise) in den drei Zweitaufgabenbedingungen. Links: Die Kontrollbedingung wurde vor der Bedingung artikulatorische Unterdrückung bearbeitet. Rechts: Die Kontrollbedingung wurde nach der Bedingung artikulatorische Unterdrückung bearbeitet.

Der linke und rechte Teil von Abbildung 4.28 wurde aus den mittleren Reaktionszeiten von jeweils sechs Versuchspersonen erstellt. Dabei gibt der linke Teil die mittleren Reaktionszeiten für die Versuchspersonen wieder, die zuerst die Kontrollbedingung bearbeiteten und danach die beiden Sitzungen mit artikulatorischer Unterdrückung absolvierten. In dieser Versuchspersonengruppe erfolgten die Reaktionen 36 ms langsamer in der Kontrollbedingung (620 ms) als in der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung (584 ms). Ging die Bedingung artikulatorische Unterdrückung in der Sitzungsabfolge der Kontrollbedingung voraus, so nahmen die mittleren Reaktionszeiten von 731 ms auf 599 ms ab ($\Delta = 132$ ms). In gleicher Weise hängt der Reaktionszeitunterschied der negativen und positiven Zahlenpaare von der Reihenfolge der Instruktionen ab: Die größte Ausprägung lag in der Zweitaufgabenbedingung vor, die zuerst bearbeitet wurde. Wurde die Kontrollbedingung zuerst bearbeitet, so betrug die Reaktionszeitdifferenz 125 ms. Die nachfolgende Bearbeitung der Bedingung artikulatorische Unterdrückung führte zu einem Reaktionszeitnachteil der negativen Zahlenpaare von 98 ms. Wurde hingegen die Bedingung artikulatorische Unterdrückung zuerst und die Kontrollbedingung danach bearbeitet, so betrug die Reaktionszeitdifferenz 99 ms bzw. 64 ms.

4.8.3.3 Der semantische Kongruenzeffekt

Die Variation der Instruktion erlaubt in diesem Experiment die Auswertung des semantischen Kongruenzeffekts getrennt für die positiven und negativen Zahlen, da für jedes Zahlenpaar beide Instruktionen realisiert wurden. Dazu wird die Summe der beiden Zahlen betrachtet, d. h. negative bzw. positive Summen geben Summen negativer bzw. positiver Zahlenpaare wieder. Gemäß dem semantischen Kongruenzeffekt sollte auf zwei numerisch kleine positive Zahlen schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl reagiert werden“, wohingegen die Reaktionen auf numerisch große positive Zahlen schneller unter der Instruktion, die numerisch größere auszuwählen, abgegeben werden sollten. Wie allerdings aus Abbildung 4.29 ersichtlich ist, folgt das Datenmuster dem semantischen Kongruenzeffekt nicht in der eben beschriebenen Form.

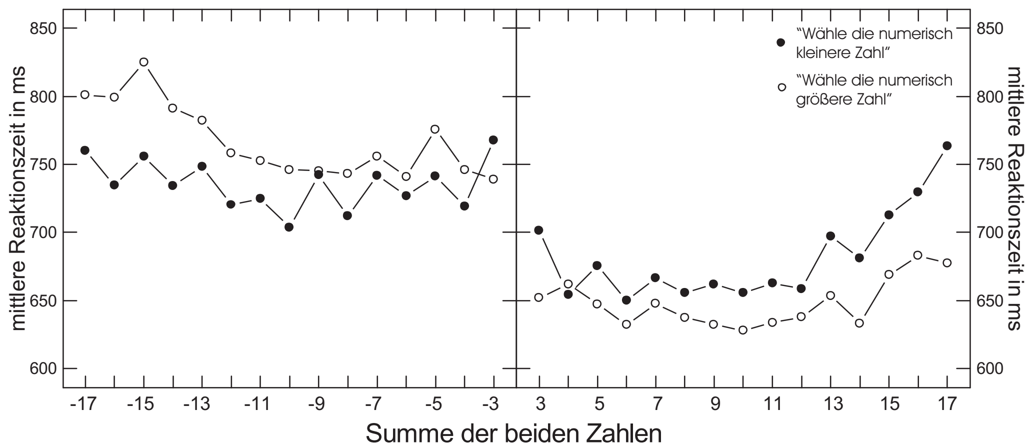


Abbildung 4.29. Der semantische Kongruenzeffekt für negative (links) und positive Zahlenpaare (rechts).

Vielmehr finden sich auf positive Zahlenpaare allgemein kürzere Reaktionszeiten unter der Instruktion, die numerisch größere im Vergleich zur numerisch kleineren der beiden Zahlen auszuwählen. Umgekehrt erfolgen bei allen negativen Zahlenpaaren schnellere Reaktionen, wenn die Instruktion lautet, die numerisch kleinere der beiden Zahlen zu bestimmen. Es fällt allerdings auf, dass innerhalb jeder Zahlenpaarart die Differenz der Reaktionszeiten zwischen den beiden Instruktionen mit Zunahme des Absolutbetrages der Summe ansteigt. Für die positiven Zahlenpaare erfolgt die Reaktion mit Ansteigen der Summe der beiden Zahlen schneller unter der „Wähle die numerisch größere Zahl“-Instruktion bzw. langsamer unter der „Wähle die numerisch kleinere Zahl“-Instruktion. Dieses Ergebnis wurde mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse überprüft. Der Faktor Summe der beiden Zahlen wurde als dreistufige Variable codiert, indem die

Summen 3–17 in drei Gruppen aufgeteilt wurden: Summe 3–7 (klein), Summe 8–12 (mittel) und Summe 13–17 (groß). Den zweiten Faktor bildet die Instruktion (größere Zahl vs. kleinere Zahl auswählen). Sowohl die beiden Haupteffekte Summe ($F_{2,22}$ = 16.198, p = .001 nach GG) und Instruktion ($F_{1,11}$ = 11.822, p = .006) als auch die Interaktion Summe × Instruktion ($F_{2,22}$ = 7.327, p = .004) können als signifikant bezeichnet werden. Bezogen auf die Reaktionszeitdifferenzen zwischen den beiden Instruktionen lauten die Werte für kleine, mittlere und große Summen 21 ms, 25 ms und 58 ms zugunsten der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Abbildung 4.29. In gleicher Weise wurde mit den negativen Zahlenpaaren verfahren. Die Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse mit den beiden Faktoren Absolutbetrag der Summe (klein, mittel und groß) und Instruktion entsprechen denen der positiven Zahlenpaare. Der Haupteffekt Absolutbetrag der Summe wird signifikant ($F_{2,22}$ = 29.852, p < .0005). Die Reaktionszeiten auf kleine, mittlere und große Absolutbeträge der Summen lauten: 746 ms, 735 ms und 774 ms. Ebenfalls findet der Vorteil der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl“ durch den signifikanten Haupteffekt Instruktion inferenzstatistische Bestätigung ($F_{1,11}$ = 10.382, p = .008). Schließlich erreicht die Interaktion Absolutbetrag der Summe × Instruktion statistische Signifikanz ($F_{2,22}$ = 9.153, p = .003 nach GG). Für kleine, mittlere und große Absolutbeträge der Summen erhält man zugunsten der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl“ Reaktionszeitdifferenzen von 12 ms, 28 ms und 53 ms.

Dem Einwand, Summen mittlerer Größe (z. B. 8, 9, 10 für positive Zahlenpaare) enthielten eine größere Anzahl verschiedener numerischer Differenzen, soll Abbildung 4.30 entgegengebracht werden.

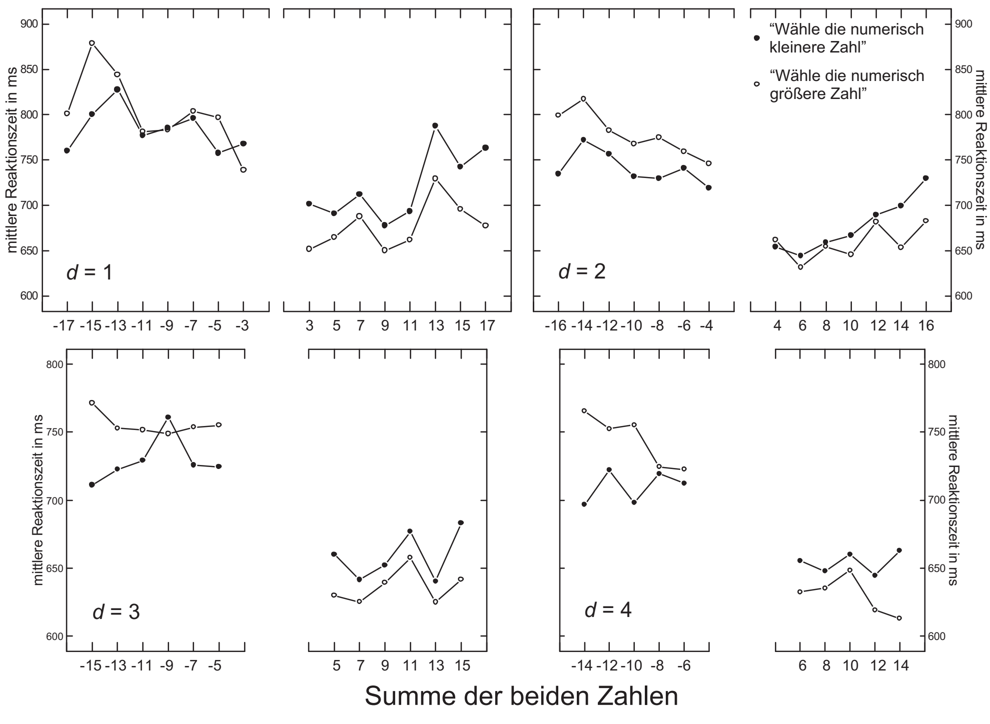


Abbildung 4.30. Der semantische Kongruenzeffekt für die numerischen Differenzen d = 1 bis d = 4.

Beispielsweise enthält die Summe 11 alle ungeraden numerischen Differenzen von $d = 1$ bis $d = 7$, die Summe 10 enthält alle geraden numerischen Differenzen von $d = 2$ bis $d = 8$, wohingegen in die Summe 3 oder 17 nur die numerische Differenz $d = 1$ eingeht. Abbildung 4.30 zeigt jedoch, dass der semantische Kongruenzeffekt zumindest bei großen absoluten Summen pro numerischer Differenz vorliegt, was daran zu erkennen ist, dass die Reaktionszeiten für die beiden Instruktionen mit Ansteigen des Absolutbetrages der Summe auseinander laufen. Eine Ausnahme bildet bei den negativen Zahlenpaaren nur die numerische Differenz $d = 1$ und bei den positiven Zahlenpaaren die numerische Differenz $d = 2$. Bei kleinen absoluten Summen äußert sich der semantische Kongruenzeffekt leider nicht eindeutig. Hier findet sich bei fast allen numerischen Differenzen ein Reaktionszeitvorteil der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ für positive Zahlenpaare bzw. „Wähle die numerisch kleinere Zahl“ für negative Zahlenpaare.

4.8.4 Diskussion

In diesem Experiment konnte der Reaktionszeitvorteil der positiven gegenüber den negativen Zahlenpaaren wiederhergestellt werden. Aufgrund der Variation der Instruktion benötigten Versuchspersonen im Mittel 89 ms länger zur Beantwortung negativer Zahlenpaare. Dieser für das Überprüfen des Einflusses der Zweitaufgabenbedingung notwendige Reaktionszeitunterschied ist somit gegeben. Gemittelt über alle Versuchspersonen erfolgten die Reaktionen am schnellsten in der Kontrollbedingung und am langsamsten in der *foot tapping*-Bedingung, wobei zwischen Kontrollbedingung und artikulatorischer Unterdrückung kein signifikanter Reaktionszeitunterschied festzustellen war. Weitaus bedeutsamer für die Unterscheidung zwischen den beiden konkurrierenden Annahmen ist jedoch der ausbleibende Einfluss der Zweitaufgabe auf den Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren. Obwohl die Variation der Instruktion ein signifikantes Ansteigen der Reaktionszeiten negativer im Vergleich zu positiven Zahlen in allen drei Zweitaufgabenbedingungen zur Folge hatte, wirkte sich artikulatorische Unterdrückung bei Betrachtung der über alle Versuchspersonen gemittelten Reaktionszeiten nicht zusätzlich auf den Reaktionszeitunterschied aus.

Das Ausführen von *inner speech* ließ sich erneut nicht nachweisen. Somit wurde die nicht-signifikante Interaktion zwischen der Art des Zahlenpaares und der Zweitaufgabenbedingung aus Experiment 6 in diesem Experiment repliziert. Folgt man der Argumentation aus Abschnitt 4.6.1, dann sollte nun die Entscheidung pro Interferenzannahme getroffen werden. Allerdings gibt es zahlreiche Ergebnisse, die gegen die Interferenzannahme und darüber hinaus für die Strategie der Instruktionsumkehr sprechen.

Der ausbleibende Einfluss der Zweitaufgabenbedingung auf den Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren könnte auf die Reihenfolge der beiden Zweitaufgabenbedingungen Kontrolle und artikulatorische Unterdrückung zurückzuführen sein. In der Zweitaufgabenbedingung, die von den Versuchspersonen zuerst bearbeitet wurde, waren höhere Reaktionszeiten und damit einhergehend höhere Reaktionszeitunterschiede zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren zu verzeichnen. Dies bedeutet, dass das Bearbeiten der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung nach der Kontrollbedingung sogar zu kürzeren Reaktionszeiten und infolgedessen zu einem kleineren Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren führte. Als Erklärung hierfür kann Übung angeführt werden: Je später die Sitzung, desto schneller die Reaktionen. Dieses Ergebnis lässt berechtigte Kritik am methodischen Vorgehen der geblockten Bearbeitung der Zweitaufgaben aufkommen. Diese wurde jedoch bewusst gewählt, um die Aufgabe nicht durch eine ständige Änderung des Antwortformats (Ergebnis aussprechen vs. Taste drücken) zu erschweren. Im Hinblick auf zukünftige Untersuchungen scheint die innerhalb einer Sitzung blockweise Variation der Zweitaufgabenbedingungen angemessener. Mit diesem Vorgehen könnte dem stärkeren Wirken artikulatorischer Unterdrückung gerade zu Beginn des Experiments systematisch nachgegangen werden.

Ein weiteres Ergebnis der Instruktionsreihenfolge spricht für dieses Vorgehen. Die mittleren Reaktionszeiten in der Kontrollbedingung unterscheiden sich kaum in Hinblick darauf, ob diese vor (620 ms) oder nach (599 ms) der Bedingung artikulatorische Unterdrückung ausgeführt wurde. Auf die Reaktionszeit der Bedingung artikulatorische Unterdrückung hat die Reihenfolge der beiden Bedingungen sehr wohl einen Einfluss. Die Versuchspersonen, die mit der artikulatorischen Unterdrückung begannen, produzierten eine mittlere Reaktionszeit von 731 ms. Hingegen gaben Versuchspersonen, die artikulatorische Unterdrückung nach der Kontrollbedingung ausführten, ihre Antworten schon nach 584 ms ab. Es handelt sich dabei um einen Reaktionszeitunterschied von 147 ms, der im Vergleich zur Differenz von 21 ms in Bezug auf die beiden möglichen Reihenfolgen der Kontrollbedingung extrem hoch ausfällt. Somit ist es plausibel anzunehmen, dass artikulatorische Unterdrückung gerade zu Beginn des Experiments höhere Reaktionszeitunterschiede im Vergleich zur Kontrollbedingung verursacht, jedoch im Laufe des Experiments ohne größere Anstrengung parallel zum numerischen Vergleich ausgeführt werden kann. Diese Schlussfolgerungen müssen jedoch eingeschränkt betrachtet werden, da jede Instruktionsreihenfolge nur von sechs Versuchspersonen bearbeitete wurde.

Interessanterweise ergaben sich die gleichen Effekte der Instruktion auf positive und negative Zahlenpaare, die auch schon von Fischer (2003) sowie Shaki und Petrusic (2005) gezeigt wurden. So erfolgte die Beantwortung positiver Zahlenpaare dann schneller, wenn die numerisch größere im Vergleich zur numerisch kleineren Zahl ausgewählt werden sollte. Umgekehrt ließen sich dann kürzere Reaktionszeiten finden, wenn aus zwei negativen Zahlen die numerisch kleinere im Vergleich zur numerisch größeren bestimmt wurde. Shaki und Petrusic gelangten auch dann zu diesem Ergebnis, wenn die Darbietung positiver und negativer Zahlenpaare geblockt erfolgte. Der unterschiedliche Einfluss der Instruktion kann nur vor dem Hintergrund des semantischen Kongruenzeffekts interpretiert werden. Je größer die Summe zweier positiver Zahlen war, desto schneller wurde unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ im Vergleich zu „Wähle die numerisch kleinere Zahl“ reagiert. Allerdings muss angemerkt werden, dass dieses Ergebnis nicht dem gewöhnlichen semantischen Kongruenzeffekt nach Banks et al. (1976) entspricht. In deren Experiment mit ausschließlich positiven Zahlenpaaren wurde die Reaktion bei numerisch kleinen Summen schneller unter der Instruktion, die numerisch kleinere Zahl auszuwählen, abgegeben. Demzufolge müssten sich die Reaktionszeitverläufe der beiden Instruktionsbedingungen überkreuzen. Ganz im Gegensatz dazu kann in diesem Experiment auch bei positiven Zahlenpaaren mit kleinen Summen schneller die numerisch größere der beiden Zahlen ausgewählt werden. Eine Erklärung dafür könnte in den generell kürzeren Reaktionszeiten unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ im Vergleich zu „Wähle die numerisch kleinere Zahl“ zu finden sein. Eine leichte Verringerung dieses Reaktionszeitvorteils würde eine Überschneidung der beiden Reaktionszeitverläufe zur Folge haben, was genau dem Ergebnis von Banks et al. entspräche. Der generelle Reaktionszeitvorteil der ‚größer‘-Instruktion ist in der Literatur immer wieder zu finden

(z. B. Banks et al., 1976; Dehaene et al., 1990; Parkman, 1971; Shoben et al., 1989). Sowohl Banks et al. als auch Dehaene (1989) wollten diesem Ergebnis in ihren Modellen Rechnung tragen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Allerdings kann keines der Modelle vorhersagen, dass auch auf numerisch kleine (positive) Zahlen im Mittel schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl" geantwortet werden kann.

Für die negativen Zahlenpaare ergaben sich umso schnellere Reaktionen unter der Instruktion, die numerisch kleinere der beiden Zahlen auszuwählen, je größer der Absolutbetrag der beiden Zahlen des Zahlenpaares war. Wie lässt sich der umgekehrte Effekt der Instruktion innerhalb der negativen Zahlenpaare erklären? Shaki und Petrusic (2005) fanden lediglich einen kategorialen Effekt. Aus zwei positiven Zahlen konnte schneller die numerisch größere, aus zwei negativen Zahlen schneller die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden. Die Autoren führen an, dass dieses Ergebnismuster dem typischen Kongruenzeffekt entspräche, was als Beleg für die Ausweitung des mentalen Zahlenstrahls in den negativen Zahlenbereich gelten könne. Dieser Interpretation muss entschieden widersprochen werden. Vielmehr deuten die Ergebnisse aus Experiment 5 darauf hin, dass auch in diesem Experiment nicht die numerische Größe sondern die absolute Größe zweier negativer Zahlen bestimmt wurde. Die Argumentation schließt sich weitgehend der Diskussion aus Experiment 6 an. Das Ergebnis zum Größenkongruenzeffekt aus Experiment 5 lieferte einen Beleg dafür, dass numerisch kleine negative Zahlen keineswegs als ‚kleine' Größen aufgefasst werden. Mit dem Größenkongruenzeffekt konnte für negative Zahlenpaare gezeigt werden, dass eine Übereinstimmung der numerischen und physikalischen Größe (z. B. −9 −3) zu höheren Reaktionszeiten führte als eine Übereinstimmung der absoluten und physikalischen Größe (z. B. −9 −3). Dies führte zur Formulierung der Interferenzannahme, mit der – unter der zusätzlichen Annahme einer Interferenz zwischen absoluter und numerischer Größe – von der Existenz eines mentalen Zahlenstrahls ausgegangen wurde. Die Interferenzannahme würde vorhersagen, dass aus zwei numerisch kleinen und damit subjektiv großen negativen Zahlen schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl" geantwortet werden sollte, da die subjektive Größe bedeutsamer ist als die numerische Größe (vgl. Tab. 2.1). Entgegen dieser Vorhersage kann jedoch aus zwei numerisch kleinen negativen Zahlen (z. B. −8 −9) schneller die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden. Dieses Ergebnis ist mit den Eigenschaften der mentalen Größenrepräsentation negativer Zahlen, wie sie in der Interferenzannahme formuliert wurden, nicht vereinbar. Allerdings kann dieses Ergebnis genutzt werden, zwischen den beiden Strategieannahmen zu unterscheiden. Dies soll am Beispiel des Zahlenpaares −8 −9 geschehen. Würde die Strategie darin bestehen, anstelle der numerisch größeren, die absolut größere Zahl ($|-9|$) auszuwählen, dann aber die andere Taste zu drücken (Reaktionsumkehr), so sollte sich, wie auch für die positiven Zahlen, ein Reaktionszeitvorteil der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl" ergeben (vgl. Tab. 2.1). Die kürzeren Reaktionszeiten unter der ‚kleiner'-Instruktion schließen die Strategie der Reaktionsumkehr als Erklärung aus.

Die Annahme der Instruktionsumkehr hingegen sagt genau dieses Ergebnis voraus. Lautet die Instruktion, die numerisch kleinere Zahl des Zahlenpaares zu bestimmen, so wird die absolut größere Zahl ($|-9|$) ausgewählt. Laut semantischem Kongruenzeffekt kann aus zwei absolut großen (numerisch kleinen) Zahlen schneller die absolut größere (und damit numerisch kleinere) im Vergleich zur absolut kleineren (und damit numerisch größeren) bestimmt werden. Für negative Zahlen müsste sich demzufolge ein Reaktionszeitvorteil unter der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl" zeigen lassen, was mit den Ergebnissen zu den negativen Zahlen übereinstimmt.

Die Annahme der Instruktionsumkehr liefert demzufolge eine gute Erklärung für das produzierte Datenmuster. Die Anwendung der Strategie der Instruktionsumkehr erklärt auch den Reaktionszeitvorteil positiver im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren. Da die Instruktion und die nachfolgende Art des Zahlenpaares nicht vorhersagbar ist, kann die entsprechende Strategie der Instruktionsumkehr erst dann zur Anwendung kommen, wenn sowohl die Instruktion als auch das negative Zahlenpaar präsentiert wurden. Da diese Instruktionsumkehr bei positiven Zahlenpaaren nicht notwendig ist und die Auswahl der numerischen Größe gemäß der Instruktion sofort bei Präsentation eines positiven Zahlenpaares erfolgen kann, ergeben sich für positive Zahlenpaare geringere Reaktionszeiten.

Akzeptiert man die Annahme der Instruktionsumkehr für die Erklärung der Ergebnisse, so steht dennoch zur Debatte, weshalb sich artikulatorische Unterdrückung nicht darauf auswirkte. Man könnte annehmen, dass sich die Minuszeichen als Cue für den Abruf der Strategie im Laufe des Experiments als ausreichend erwiesen. Das Minuszeichen löste die Anwendung der Strategie aus, die dann auf die Auswahl der korrekten Antwort angewendet werden konnte. Dies würde jedoch implizieren, dass die Strategie nicht mehr innerlich verbalisiert werden musste. Infolgedessen würde artikulatorische Unterdrückung wirkungslos bleiben. Ein Hinweis darauf ist in Bryck und Mayr (2005) zu finden. Diese konnten in ihrem Experiment zum Aufgabenwechsel keinen Einfluss der artikulatorischen Unterdrückung nachweisen, wenn die geforderte Aufgabe explizit durch Operationszeichen angezeigt wurde. Miyake et al. (2004) verglichen Wort- mit Buchstaben-Cues und fanden nur mit Buchstaben-Cues einen Einfluss der artikulatorischen Unterdrückung. Im Gegensatz dazu konnten Emerson und Miyake (2003) sowohl mit arbiträren Farbcues als auch mit expliziten Symbolcues erhöhte Gesamtbearbeitungszeiten in der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung aufzeigen. Inwieweit der Einsatz von Cues das Wirken artikulatorischer Unterdrückung neutralisiert, ist somit noch nicht eindeutig geklärt. In dem hier durchgeführten Experiment kam die Strategie nur bei negativen Zahlenpaaren zur Anwendung, bei den positiven Zahlenpaaren konnte die zu Beginn des Durchgangs angezeigte Instruktion beibehalten werden. Die beiden Minuszeichen könnten für das Aktivieren der Strategie genügt haben, in dem sie der Versuchsperson als Hinweis dafür dienten „etwas anders zu machen“, in diesem Fall das Umkehren der Instruktion.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ergebnisse zum semantischen Kongruenzeffekt auf die Verwendung von Strategien hindeuten. Der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlen wurde nicht durch die Art der Zweitaufgabe beeinflusst, was dafür spricht, dass das Abrufen bzw. Aktivieren der Strategie ohne innerliches Verbalisieren vonstatten geht. Allerdings deuten die Ergebnisse daraufhin, dass artikulatorische Unterdrückung ohne vorherige Übungssitzung einen nachweislichen Nachteil bei der Bearbeitung negativer Zahlenpaare herbeiführen könnte.

5 Abschließende Diskussion

5.1 Zentrale Fragestellung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, auf welchen mentalen Größenrepräsentationen der numerische Vergleich negativer Zahlen basiert. Die Existenz einer eigenständigen, d. h. von der der positiven Zahlen klar abgrenzbaren, mentalen Größenrepräsentation negativer Zahlen bildet die Grundlage der Zahlenstrahl- und der Interferenzannahme. In der *Zahlenstrahlannahme* wird davon ausgegangen, dass es einen negativen mentalen Zahlenstrahl gibt, auf dem die numerische Größe der negativen Zahl repräsentiert wird. Hingegen stellt die Möglichkeit, dass numerisch kleine (große) negative Zahlen keineswegs als subjektiv kleine (große) numerische Größen aufgefasst werden, den Ausgangspunkt der *Interferenzannahme* dar. Darin wird angenommen, dass die absolute numerische Größe der negativen Zahl mental repräsentiert ist und dadurch während des numerischen Vergleiches eine Interferenz mit der in der Instruktion geforderten numerischen Größe entsteht. Alternativ zur Zahlenstrahl- und Interferenzannahme wird mit der *Strategieannahme* die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls abgelehnt. Laut Strategieannahme beruht der numerische Vergleich negativer Zahlen auf der mentalen Repräsentation positiver Zahlen, wobei zur Generierung der korrekten Antwort entsprechende Strategien zum Einsatz kommen müssen. Hierzu wird die Strategie der Reaktionsumkehr von der Strategie der Instruktionsumkehr abgegrenzt. Beiden Strategien liegt die Annahme zugrunde, dass das numerische Vergleichsurteil anhand der Absolutwerte der beiden negativen Zahlen bestimmt wird. Mit der Strategie der Instruktionsumkehr wird angenommen, dass zur Auswahl der numerisch größeren (kleineren) Zahl die absolut kleinere (größere) Zahl eines Zahlenpaares bestimmt wird. Hingegen wird mit der Strategie der Reaktionsumkehr postuliert, dass zunächst anstelle der numerisch größeren (numerisch kleineren) die Auswahl der absolut größeren (absolut kleineren) Zahl stattfindet, anschließend jedoch die andere Antworttaste bedient wird.

In den folgenden Abschnitten soll erörtert werden, inwieweit die Ergebnisse der Experimente gemeinsam betrachtet eine Antwort auf die Frage nach der mentalen Repräsentation negativer Zahlen liefern können. Dazu werden die aus den Annahmen abgeleiteten Vorhersagen zu den Ergebnissen der durchgeführten Experimente in Beziehung gesetzt. Diese Darstellung erfolgt getrennt für die Experimente zum SNARC-Effekt, zum Größenkongruenzeffekt und zur Wirkung artikulatorischer Unterdrückung. Des Weiteren wird in gesonderten Abschnitten auf den Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren sowie den semantischen Kongruenzeffekt eingegangen.

5.2 Der SNARC-Effekt

Im ersten Teil der Arbeit lag das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung der links-rechts-Orientierung des mentalen Zahlenstrahls, wonach numerisch kleine Zahlen eher eine Assoziation mit ‚links' und numerisch große Zahlen eher eine Assoziation mit ‚rechts' aufweisen. Diese Eigenschaft der mentalen Größenrepräsentation wird aus dem negativen Anstieg der Regressionsgeraden geschlussfolgert, die den Zusammenhang zwischen den numerischen Größen und der Reaktionszeitdifferenz der Antworten mit der rechten und linken Antwortseite (SNARC-Effekt) wiedergibt (z. B. Dehaene et al., 1993).

Aus der Zahlenstrahl- und der Interferenzannahme ergab sich die Vorhersage, dass numerisch kleine negative Zahlen eher mit ‚links' und numerisch große negative Zahlen eher mit ‚rechts' assoziiert sind, was sich in einem negativen Zusammenhang zwischen der Reaktionszeitdifferenz und den negativen Vergleichszahlen äußern sollte. Demgegenüber sollte bei Gültigkeit der Strategieannahme ein kontinuierlicher SNARC-Effekt resultieren, der allein vom Absolutbetrag der Zahlen abhängt. Das Auftreten des numerischen Distanzeffekts wurde mit allen Annahmen vorhergesagt.

Zur Untersuchung der räumlich-numerischen Assoziation diente der numerische Vergleich der Zahlen −9 bis 9 (ohne −5, 0, 5) mit der Standardzahl −5 bzw. 5. Die Variation der Antwortseite ermöglichte die Betrachtung der Reaktionszeitdifferenz, die durch Antworten mit der rechten und linken Antwortseite zustande kamen. In Experiment 1 bestand zwischen diesen Reaktionszeitdifferenzen und den Vergleichszahlen sowohl für den Standard 5 als auch für den Standard −5 ein kategorialer Zusammenhang. Pro Standard ergaben sich für die Vergleichszahlen, die numerisch kleiner als der Standard waren (−9 bis −6 beim Standard −5 und −9 bis 4 beim Standard 5), dann kürzere Reaktionszeiten, wenn darauf mit einem linken im Vergleich zu einem rechten Tastendruck reagiert wurde. Umgekehrt erfolgten rechte im Vergleich zu linken Tastendrücken schneller für die Vergleichszahlen −4 bis 9 beim Standard −5 und die Vergleichszahlen 6 bis 9 beim Standard 5. Der Zusammenhang zwischen der Reaktionszeitdifferenz und den Vergleichszahlen konnte für beide Standardzahlen am besten durch eine diskontinuierliche abschnittsweise lineare Regression beschrieben werden, deren Anstiege statistisch nicht verschieden von Null waren. Dieser kategoriale Zusammenhang wurde jedoch durch den Faktor Instruktionsreihenfolge moduliert. So konnte die kategoriale Form des SNARC-Effekts nur für die Versuchspersonen gefunden werden, die in der ersten Sitzung die inkompatible Tastenzuordnung (links-größer und rechts-kleiner) bearbeiteten. Für die Versuchspersonengruppe mit der kompatiblen Tastenzuordnung (links-kleiner und rechts-größer) in der ersten Sitzung erreichte keiner der Koeffizienten der diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression statistische Signifikanz. Des Weiteren ließ sich lediglich beim Standard −5 für die negativen Zahlen −4 bis −1 ein Einfluss der numerischen Differenz nachweisen.

Bei Experiment 2 handelte es sich um eines von zwei Kontrollexperimenten, die aufgrund der beiden unerwarteten Ergebnisse in Experiment 1 notwendig wurden. Dies betrifft zum einen die kategoriale Form des SNARC-Effekts und zum anderen den fehlenden Einfluss der numerischen Differenz. Als mögliche Ursache wurde die unterschiedliche Präsentationsanzahl der Vergleichszahlen in Experiment 1 in Erwägung gezogen. Deshalb wurden in Experiment 2 alle Vergleichszahlen gleich häufig präsentiert. Dies führte für negative Vergleichszahlen beim Standard −5 sowie für die Vergleichszahlen 6–9 beim Standard 5 den numerischen Distanzeffekt zutage. Hingegen blieb der numerische Vergleich positiver Zahlen mit dem Standard −5 sowie negativer Zahlen mit dem Standard 5 ein weiteres Mal von der numerischen Differenz unbeeinflusst. Die kategoriale Form des SNARC-Effekts erfuhr in Experiment 2 eine Replikation, wobei sich die Instruktionsreihenfolge nur geringfügig auf den numerischen Vergleich negativer Zahlen mit der Standardzahl −5 auswirkte.

Das zweite Kontrollexperiment (Exp. 3) diente der Überprüfung, ob die kategoriale Form des SNARC-Effekts auf die Präsentation negativer Zahlen bzw. auf die Verwendung zweier Standardzahlen (−5 bzw. 5) zurückgeführt werden kann. Dazu wurde der numerische Vergleich positiver Zahlen mit der Standardzahl 5 herangezogen. Obgleich sich ein numerischer Distanzeffekt nachweisen ließ, konnte die kategoriale Form des SNARC-Effekts erneut anhand einer diskontinuierlichen abschnittsweise linearen Regression mit nicht von Null verschiedenen Anstiegen bestätigt werden. Die Varianzaufklärung von 99 % ist dabei bemerkenswert.

Auf den ersten Blick könnten die Ergebnisse somit für die Gültigkeit der Zahlenstrahl- oder der Interferenzannahme sprechen. Voraussetzung hierfür wäre jedoch ein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen den Vergleichszahlen und den Reaktionszeitdifferenzen gewesen. Im Gegensatz dazu bestand in beiden Experimenten zum numerischen Vergleich sowohl bei der Standardzahl −5 als auch bei der Standardzahl 5 zwischen den Vergleichszahlen und der Reaktionszeitdifferenz aus den Antworten mit der rechten und linken Hand ein kategorialer Zusammenhang.

Wood et al. (2008) berichten in ihrer Metaanalyse, dass der kategoriale SNARC-Effekt in der Mehrzahl der von ihnen gesichteten numerischen Vergleichsexperimente auftrat. Dies steht im Widerspruch zum kontinuierlichen SNARC-Effekt, der in Aufgaben zum gerade/ungerade-Status (Dehaene et al., 1993) oder *phonem-monitoring* (Fias et al., 1996) zu finden ist und für dessen Entstehen die räumlich-numerische Assoziation als Eigenschaft der mentalen Größenrepräsentation verantwortlich gemacht wird. Folgt man dieser Annahme, dann sollte sich beim numerischen Vergleich, für den ein Zugriff auf die mentale Größenrepräsentation unerlässlich ist, erst recht ein kontinuierlicher SNARC-Effekt ergeben. Die Erklärung der unterschiedlichen Formen des SNARC-Effekts werden lediglich von Gevers, Verguts et al. (2006) diskutiert. Zahlreiche Argumente sprechen jedoch gegen deren Erklärung (siehe Abschnitt 4.3.4). Dies gab Anlass zur Formulierung eines neuen Modells (siehe Abschnitt 4.3.4). Darin wurde einerseits angenommen, dass sich die Antwortseitenaktivierungen, die sich aus den räumlich-numerischen Assoziationen der numerischen Größen von Standard- und Vergleichszahl ergeben, aufheben. Andererseits wurde eine zweite Komponente in Form einer natürlichen Zuordnung von ‚klein' zu ‚links' und ‚groß' zu ‚rechts' postuliert, die eine kategoriale Form des SNARC-Effekts zur Folge hat.

Die Annahme einer natürlichen Assoziation von ‚klein' mit ‚links' sowie ‚groß' mit ‚rechts' erfuhr in einem Kontrollexperiment erste empirische Bestätigung. So konnte mit den Ergebnissen aus Experiment 4 belegt werden, dass allein auf die Wörter „klein" bzw. „groß" schneller mit einem linken bzw. rechten Tastendruck reagiert werden kann. Ferner liefern die Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass das Aufzeigen des postulierten klein-links/groß-rechts-Vorteiles keineswegs die Präsentation numerischen Materials voraussetzt, was die Abgrenzung von der räumlich-numerischen Assoziation rechtfertigen könnte. Darüber hinaus belegen zahlreiche Experimente auf eindrückliche Weise, dass es – ähnlich der postulierten natürlichen Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' – auch eine Assoziation von ‚früh' mit ‚links' und ‚spät' mit ‚rechts' zu geben scheint (Santiago et al., 2010; Tversky et al., 1991). Eine ähnliche Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Experiment von Santiago et al. (2007, siehe auch Torralbo et al., 2006) für Vergangenes und Zukünftiges. Dies könnte die in dem Modell zur Entstehung des kategorialen SNARC-Effekts erfolgte Abgrenzung eines generellen links-klein/rechts-groß-Vorteils von der räumlich-numerischen Assoziation zusätzlich begründen.

Für die zentrale Fragestellung ist entscheidend, dass die Ergebnisse zum numerischen Vergleich negativer Zahlen mit der Standardzahl −5 durch das Modell zur Entstehung des kategorialen SNARC-Effekts erklärt werden können, ohne die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls anzunehmen. Da sich die Antwortseitenaktivierungen der Standard- und Vergleichszahl gegenseitig aufheben, ist allein die in der Instruktion formulierte Zuordnung von numerisch klein bzw. numerisch groß zu den präsentierten Stimuli bedeutsam. Wird die Zahl −9 präsentiert, dann kann darauf schneller mit einem linken im Vergleich zu einem rechten Tastendruck reagiert werden, weil die Versuchsperson die Antwort (numerisch) kleiner einfacher mit ‚links' als mit ‚rechts' assoziieren kann. Umgekehrt führt die Präsentation der Zahl −1 zu einer schnelleren Reaktion mit der rechten im Vergleich zur linken Taste, weil (numerisch) größer mit ‚rechts' assoziiert ist. Aus dem kategorialen SNARC-Effekt kann somit nicht auf die zugrunde liegende Größenrepräsentation der negativen Zahlen geschlossen werden. Sowohl in Experiment 1 als auch in Experiment 2 entstanden beim numerischen Vergleich negativer Zahlen mit der Standardzahl −5 im Vergleich zum numerischen Vergleich positiver Zahlen mit der Standardzahl 5 signifikant höhere Reaktionszeiten. Die Erklärung dieses Ergebnisses gelingt mit allen drei Modellen. Der numerische Vergleich negativer Zahlen wird nur selten gefordert, weshalb der Zugriff auf deren mentale Repräsentation erschwert ist, was die größeren Reaktionszeiten verursacht (Zahlenstrahlannahme). Andererseits könnte die Interferenz zwischen der mathematisch definierten und mental repräsentierten numerischen Größe zu erhöhten Reaktionszeiten bei der numerischen Beurteilung negativer Zahlen führen (Interferenzannahme). Schließlich könnten die erhöhten Reaktionszeiten beim Standard −5 ein Hinweis darauf sein, dass nicht die numerische, sondern die absolute numerische Größe beurteilt wurde (Strategieannahme), da die Umkehr der Reaktion bzw. Instruktion einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt bedeuten könnte. Die kategoriale Form des SNARC-Effekts erlaubt somit keine Entscheidung zugunsten eines der drei Modelle.

Demgegenüber müsste der SNARC-Effekt wieder eine kontinuierliche Form erhalten und damit zur Unterscheidung der konkurrierenden Modelle beitragen, wenn in jedem Durchgang ein Zahlenpaar präsentiert wird, dessen numerisch größere bzw. numerisch kleinere Zahl per Tastendruck bestimmt werden soll. Diese Vorhersage wird durch die Daten von Shaki und Petrusic (2005) bestätigt: Ein linker (rechter) Tastendruck erfolgte umso schneller, je numerisch kleiner (größer) zwei positive Zahlen waren. Interessanterweise erfolgte die Antwortabgabe auch für negative Zahlen umso schneller mit der linken (rechten) Hand, je numerisch kleiner (größer) der Absolutbetrag der beiden Zahlen war. Dieses Ergebnis kann dahingehend gedeutet werden, dass die absolute numerische Größe zur Auswahl der korrekten Antwort ausschlaggebend war. Würde es einen negativen mentalen Zahlenstrahl geben, dann müssten numerisch kleine negative Zahlen eine Assoziation mit ‚links' und numerisch große negative Zahlen eine Assoziation mit ‚rechts' aufweisen. Zwar schlussfolgerten Shaki und Petrusic dies aus den Ergebnissen, wenn positive und negative Zahlen in einem Block präsentiert wurden. Dieser Schlussfolgerung kann aber bei genauerer Betrachtung der Daten nicht zugestimmt werden (siehe Abschnitt 2.4.2). Leider verwendeten die Autoren nur Zahlenpaare mit der numerischen Differenz $d = 1$. Aufschlussreicher wäre ein Experiment, in welchem Zahlenpaare mit den numerischen Differenzen $d = 1$ bis $d = 8$ beurteilt werden müssen.

Demzufolge existieren bisher keine Ergebnisse zum SNARC-Effekt, die auf die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls hinweisen.

Das in Abschnitt 4.3.4 formulierte Modell zur Entstehung des kategorialen SNARC-Effekts ist somit in der Lage, die unterschiedlichen Formen des SNARC-Effekts zu integrieren. Dennoch müssen zukünftige experimentelle Arbeiten weiterhin der postulierten Assoziation von ‚klein' mit ‚links' und ‚groß' mit ‚rechts' nachgehen. Obgleich das Modell auch ohne die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls auskommt, kann die Entscheidung für eine der konkurrierenden Annahmen mit der momentanen Datenlage nicht eindeutig getroffen werden.

5.3 Der Größenkongruenzeffekt

Experiment 5 verfolgte das Ziel, die mentale Repräsentation negativer Zahlen anhand der Ergebnisse zum Größenkongruenzeffekt zu untersuchen. Den Versuchspersonen wurden positive, negative und gemischte Zahlenpaare präsentiert, deren Elemente in unterschiedlichen Schriftgrößen dargestellt wurden. In einem größenkongruenten Zahlenpaar wurde die numerisch größere Zahl des Zahlenpaares gleichzeitig als physikalisch größere der beiden Zahlen dargestellt (z. B. $_{-6}$ −4). Indes stimmten die numerischen Größen in einem größeninkongruenten Zahlenpaar nicht mit den physikalischen Größen überein (z. B. $_{-4}$ −6). Es wurde davon ausgegangen, dass nur bei Gültigkeit der Zahlenstrahlannahme auf kongruente negative Zahlenpaare schneller geantwortet werden sollte als auf inkongruente negative Zahlenpaare. Liegt hingegen eine Interferenz zwischen der mental repräsentierten und mathematisch definierten numerischen Größe einer negativen Zahl vor, dann sollte die Beantwortung kongruenter negativer Zahlenpaare mehr Zeit beanspruchen als die Beantwortung inkongruenter negativer Zahlenpaare. Gleichermaßen ergibt sich für die Verwendung von Strategien seitens der Versuchsperson die Vorhersage größerer Reaktionszeiten für die Beantwortung kongruenter im Vergleich zu inkongruenten Zahlenpaaren. Dieses Experiment ermöglichte zudem die Untersuchung gemischter Zahlenpaare, insbesondere ob sich anhand dieser eine Aktivierung der mentalen Repräsentation auf dem positiven und negativen Teil des mentalen Zahlenstrahls anhand des Einflusses der numerischen Differenz zeigen lässt.

Für den numerischen Vergleich zweier positiver Zahlen gelang eine Replikation des Größenkongruenzeffekts. Die Antwortabgabe erfolgte 45 ms schneller bei Präsentation eines kongruenten im Vergleich zu einem inkongruenten Zahlenpaar. Umgekehrt erbrachte die Analyse für inkongruente negative Zahlenpaare im Vergleich zu kongruenten negativen Zahlenpaaren kürzere Reaktionszeiten. Der Reaktionszeitvorteil der inkongruenten negativen Zahlenpaare betrug dabei 20 ms. Trotz der geringeren Ausprägung des umgekehrten Größenkongruenzeffekts beim numerischen Vergleich negativer Zahlen konnte dieser in jeder der elf Sitzungen nachgewiesen werden. Des Weiteren wurde für die Beantwortung negativer Zahlenpaare im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren signifikant mehr Zeit benötigt ($\Delta = 49$ ms).

Die Ergebnisse zum umgekehrten Größenkongruenzeffekt deuten darauf hin, dass das numerische Urteil von der absoluten numerischen Größe der negativen Zahlen beeinflusst wird. Demzufolge stehen die Ergebnisse im Einklang mit der Vorhersage der Strategieannahme. Eine Entscheidung zugunsten einer der beiden formulierten Strategien ist allerdings nicht möglich. Der umgekehrte Größenkongruenzeffekt widerspricht eindeutig den Vorhersagen der Zahlenstrahlannahme. Daraus kann man schlussfolgern, dass numerisch kleine negative Zahlen keineswegs als „kleine“ Zahlen und numerisch große negative Zahlen keineswegs als „große“ Zahlen angesehen werden. Dies schließt die mentale Repräsentation der numerischen Größe einer negativen Zahl auf dem mentalen Zahlenstrahl aus. Mit den Ergebnissen zum Größenkongruenzeffekt innerhalb negativer Zahlenpaare kann die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls nur beibehalten werden, wenn man annimmt, dass die absolute numerische Größe einer negativen Zahl mental repräsentiert wird. Dies ist durch die Interferenzannahme gegeben. Die Diskussion zum Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlen wird an späterer Stelle noch einmal aufgegriffen (siehe Abschnitt 5.5).

Im Vergleich zu den Reaktionszeiten positiver und negativer Zahlenpaare wurden bei der Auswahl der numerisch größeren eines gemischten Zahlenpaares die kürzesten Reaktionszeiten erzielt. In den Reaktionszeiten der gemischten Zahlenpaare ließ sich weder ein Einfluss der numerischen noch der absoluten numerischen Differenz feststellen. Der Einfluss der Größenkongruenz erwies sich bei dieser Zahlenpaarart als vernachlässigbar gering. Allerdings ergab sich ein statistisch bedeutsamer Beitrag der numerischen Kongruenz. Diese bezieht sich auf den Umstand, dass die numerisch größere Zahl entweder die absolut größere (kongruent, z. B. −4 6) oder die absolut kleinere Zahl (inkongruent, z. B. −6 4) sein kann. Es zeigte sich, dass Versuchspersonen signifikant schneller auf numerisch kongruente als auf numerisch inkongruente Zahlenpaare antworten konnten. Letzteres Ergebnis in Kombination mit den schnellen Reaktionen deutet darauf hin, dass weniger ein numerischer Vergleich einer positiven mit einer negativen Zahl sondern eine einfache Klassifizierung nach Plus- und Minuszeichen stattfindet. Der Einfluss der numerischen Kongruenz belegt dennoch, dass die absolute numerische Größe nicht vollständig ignoriert werden kann. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die absolute numerische Größe mental repräsentiert wurde. Dies spricht gegen einen mentalen Zahlenstrahl mit Ausweitung in den negativen Bereich.

Die bei gemischten Zahlenpaaren auftretende Abhängigkeit der Reaktionszeiten allein von der absoluten numerischen Größe steht mit den Ergebnissen zahlreicher unterschiedlicher Versuchsanordnungen in Einklang, in denen das Vorzeichen für die Bearbeitung der Aufgabe irrelevant war. Zu nennen wären der numerische Vergleich zur Zahl Null (Fischer & Rottmann, 2005), die Beurteilung der Parität (Fischer & Rottmann, 2005; Nuerk et al., 2004) sowie ein kürzlich veröffentlichtes Experiment zum physikalischen und numerischen Größenvergleich (Tzelgov, Ganor-Stern & Maymon-Schreiber, 2009). Im ersten Teil von Experiment 1 bearbeiteten die Versuchspersonen von Tzelgov et al. (2009) – wie in Experiment 5 der vorliegenden Arbeit – positive, negative und gemischte Zahlenpaare, deren Elemente in unterschiedlichen physikalischen Größen dargeboten wurden. In jedem Durchgang sollte die physikalisch kleinere bzw. größere der beiden Zahlen ausgewählt werden. Dabei ergab sich für die positiven Zahlenpaare der gewöhnliche Größenkongruenzeffekt mit schnelleren Reaktionen auf kongruente im Vergleich zu inkongruenten Zahlenpaaren. Demgegenüber erzielten Versuchspersonen bei der Beurteilung inkongruenter negativer Zahlenpaare im Vergleich zu kongruenten negativen Zahlenpaaren kürzere Reaktionszeiten (umgekehrter Größenkongruenzeffekt). Für die gemischten Zahlenpaare ließ sich nur unter Berücksichtigung der numerischen Kongruenz ein Einfluss der Größenkongruenz auf die Reaktionszeiten nachweisen. Die Kombination der numerischen mit der Größenkongruenz gibt Tabelle 5.1 wieder. Tzelgov et al. fanden innerhalb der numerisch inkongruenten Zahlenpaare einen umgekehrten Größenkongruenzeffekt, innerhalb der numerisch kongruenten Zahlenpaare jedoch den normalen Größenkongruenzeffekt. Dies spricht für den Einfluss der absoluten numerischen Größe.

Tabelle 5.1

Kombination aus numerischer Kongruenz und Größenkongruenz am Beispiel eines Zahlenpaares

	Größenkongruenz	
	kongruent	inkongruent
numerische Kongruenz		
kongruent	−2 5	−2 5
inkongruent	−5 2	−5 2

Auf die Variation der physikalischen Größe wurde im zweiten Teil des Experiments verzichtet. Die Versuchspersonen wurden instruiert, die numerisch kleinere bzw. größere Zahl des Zahlenpaares auszuwählen. Wie auch schon in Experiment 5 der vorliegenden Untersuchung ließ sich kein Einfluss der numerischen Differenz auf die Reaktionszeiten der gemischten Zahlenpaare nachweisen.

Somit deuten alle Experimente, in denen das Vorzeichen für die Lösung der Aufgabe irrelevant ist, in die gleiche Richtung: Sofern negative Zahlen eigenständige mentale Größenrepräsentationen besitzen, werden diese nicht automatisch aktiviert. Vielmehr findet eine obligatorische Aktivierung der mentalen Größenrepräsentation der absoluten numerischen Größe einer negativen Zahl auf dem (positiven) mentalen Zahlenstrahl statt.

5.4 Die Wirkung artikulatorischer Unterdrückung

In zwei Experimenten (Exp. 6 und 8) wurde der Frage nachgegangen, ob die (möglicherweise) eingesetzten Strategien als verbale Selbstinstruktionen aufgefasst werden können. So wäre es vorstellbar, dass die Versuchsperson ihre Strategie bei Präsentation eines negativen Zahlenpaares innerlich verbalisiert. Verbale Selbstinstruktion wird in der Literatur häufig als *inner speech* bezeichnet (z. B. Baddeley et al., 2001) und kann durch artikulatorische Unterdrückung experimentell manipuliert werden (Baddeley et al., 2001; Bryck & Mayr, 2005; Emerson & Miyake, 2003; Miyake et al., 2004). Daraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass eine verbale Zweitaufgabe (artikulatorische Unterdrückung) im Vergleich zu einer Kontrollbedingung (keine Zweitaufgabe bzw. *foot tapping*) zu einer Erhöhung des Reaktionszeitunterschiedes zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren führt. Im Gegensatz dazu wurde – in Anlehnung an die Ergebnisse von Saeki (2007) – für die Interferenzannahme vorhergesagt, dass die Reaktionszeitdifferenz von der Art der Zweitaufgabe (keine, artikulatorische Unterdrückung, *foot tapping*) unbeeinflusst bleibt. Außerdem sollte eine verbale Zweitaufgabe keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Verarbeitung positiver im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren ausüben, wenn die Zahlenstrahlannahme gilt.

In Experiment 6 entstanden in der Kontrollbedingung und der artikulatorischen Unterdrückungsbedingung identische mittlere Reaktionszeiten. Im Vergleich dazu fielen die mittleren Reaktionszeiten in der Bedingung *foot tapping* deutlich höher aus, was sicherlich auf das unterschiedliche Antwortformat (Tastendruck vs. verbale Antwort) zurückgeführt werden kann. Die für die Annahmen entscheidende Interaktion zwischen der Art des Zahlenpaares und der Zweitaufgabenbedingung war nicht signifikant. Allerdings ließ sich in diesem Experiment kein Reaktionszeitunterschied zwischen den Antworten auf positive und negative Zahlenpaare nachweisen. Dieses Ergebnis wird in Abschnitt 5.5 eingehend diskutiert.

Der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren bildete die Grundlage der Hypothesen für die einzelnen Annahmen. Das Ausbleiben dieses Reaktionszeitunterschiedes selbst in der Kontrollbedingung ohne Zweitaufgabe könnte erklären, weshalb die artikulatorische Unterdrückung nicht wirksam war. Um sicherzustellen, dass die Beantwortung negativer Zahlenpaare mehr Zeit beansprucht als die Beantwortung positiver Zahlenpaare, wurde die Instruktion in Experiment 8 von Durchgang zu Durchgang variiert. Erneut wurde die Hypothese formuliert, dass der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren von der Art der Zweitaufgabe (keine, artikulatorische Unterdrückung, *foot tapping*) beeinflusst wird, wenn die Strategie in Form einer verbalisierten Selbstinstruktion angewendet wird, nicht aber wenn die Interferenz- oder die Zahlenstrahlannahme gilt.

Die Versuchspersonen aus Experiment 8 benötigten für die Beantwortung negativer Zahlenpaare signifikant mehr Zeit als für die Beantwortung positiver Zahlenpaare. Dieser Reaktionszeitunterschied wurde allerdings nicht von der Art der Zweitaufgabe beeinflusst. Obwohl zwischen der Kontrollbedingung und der Bedingung artikulatorische Unterdrückung ein deutlicher Unterschied in den Reaktionszeiten vorlag, konnte dieser inferenzstatistisch nicht abgesichert werden. Ein gewöhnlicher Übungseffekt schien dafür verantwortlich zu sein. Die Analyse der Reaktionszeiten unter Berücksichtigung der Reihenfolge von Kontrollbedingung und artikulatorischer Unterdrückung führte in der Bedingung größere Reaktionszeiten zutage, die im Verlauf des Experiments zuerst bearbeitet wurde. Dieser Übungseffekt war jedoch für die Versuchspersonengruppe stärker ausgeprägt, die die Bedingung artikulatorische Unterdrückung vor der Kontrollbedingung ausführten im Vergleich zu der Versuchspersonengruppe mit umgekehrter Bedingungsreihenfolge.

Somit kann sowohl die Interferenz- als auch die Zahlenstrahlannahme mit der nicht-signifikanten Interaktion zwischen der Art des Zahlenpaares und der Art der Zweitaufgabe beibehalten werden. Gleichzeitig widersprechen die Ergebnisse der Annahme, dass es sich bei der möglicherweise angewendeten Strategie um eine verbale Selbstinstruktion handelt. Allerdings lässt der Übungseffekt berechtigte Zweifel an der Angemessenheit des experimentellen Vorgehens aufkommen. Ohne die Diskussion aus Experiment 8 zu wiederholen, besteht einerseits die Möglichkeit, dass innerliche Verbalisierung der Strategie zu Beginn des Experiments stattfand und im Laufe der Übungssitzung automatisierte. Andererseits könnte die ausbleibende Wirkung der artikulatorischen Unterdrückung darauf hindeuten, dass sich die Minuszeichen als Cue für den Abruf der Strategie als ausreichend erwiesen. Dieser fehlende Einfluss artikulatorischer Unterdrückung bei Präsentation expliziter Aufgabencues konnte auch von Bryck und Mayr (2005) sowie Miyake et al. (2004) mit Experimenten zum *task switching* aufgezeigt werden. Beide Forschergruppen gehen davon aus, dass ein aktiver Abruf der Aufgabe in Form von *inner speech* bei Präsentation expliziter Aufgabencues nicht notwendig ist. Da eine negative Zahl jedoch mit einem Minuszeichen gekennzeichnet werden muss, besteht die Möglichkeit, dass artikulatorische Unterdrückung zum Aufzeigen der Gültigkeit der Strategieannahme insgesamt unbrauchbar ist.

5.5 Der Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren

Die in der Interferenzannahme postulierte Interferenz impliziert, dass bei der numerischen Beurteilung zweier negativer im Vergleich zu zwei positiven Zahlen mehr kognitive Ressourcen beansprucht werden. Dadurch müssten sich generell längere Reaktionszeiten für den numerischen Vergleich zweier negativer im Vergleich zu zwei positiven Zahlen finden lassen. Mit der Zahlenstrahlannahme könnte ebenfalls ein Nachteil der Beantwortung negativer Zahlenpaare vorhergesagt werden, wenn man annimmt, dass der numerische Vergleich negativer Zahlen ungeübt ist. Aus den Strategieannahmen wurde abgeleitet, dass signifikant größere Reaktionszeiten für negative Zahlenpaare entstehen müssten, da mit beiden Strategien zusätzliche Verarbeitungsschritte (Umkehr der Instruktion bzw. der Reaktion) notwendig sind.

Dieser von allen drei Annahmen vorhergesagte Reaktionszeitnachteil der negativen gegenüber den positiven Zahlenpaaren ließ sich in Experiment 5 belegen. Demgegenüber konnte in Experiment 6 kein signifikanter Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren festgestellt werden. Die Analyse des Reaktionszeitunterschiedes pro Versuchsperson zeigte, dass dieser bei fünf von acht Versuchspersonen schon in der ersten Sitzung verschwand. Dieses Ergebnis ist zunächst mit keiner der Annahmen in Einklang zu bringen.

Mit einem Kontrollexperiment (Exp. 7) wurde untersucht, ob die ausschließliche Präsentation positiver und negativer Zahlenpaare zum Verschwinden des Reaktionszeitunterschiedes führte. In diesem Experiment absolvierte jede Versuchsperson zwei Sitzungen zum numerischen Vergleich negativer sowie positiver Zahlen. Die entscheidende experimentelle Manipulation bildete die zusätzliche Präsentation gemischter Zahlenpaare in einer der beiden Sitzungen. Die Hypothese lautete, dass der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren von der Präsentation gemischter Zahlenpaare abhängt. Wurden in einer Sitzung ausschließlich positive und negative Zahlenpaare präsentiert, so betrug der Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren im Mittel 45 ms. War in der anderen Sitzung zusätzlich die Beurteilung gemischter Zahlenpaare gefordert, stieg die Reaktionszeitdifferenz auf einen Wert von 71 ms an. Der Beitrag der gemischten Zahlenpaare zum Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren wird unter Berücksichtigung der Reihenfolge der beiden Sitzungen noch deutlicher. Dazu wurde der letzte Replikationsblock der ersten Sitzung dem ersten Replikationsblock der zweiten Sitzung gegenübergestellt. Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung gemischte Zahlenpaare bearbeiteten, erzielten am Ende der ersten Sitzung Reaktionszeitunterschiede zugunsten der positiven Zahlenpaare von 75 ms. Zu Beginn der zweiten Sitzung (ohne gemischte Zahlenpaare) sank diese Differenz auf einen Wert von 55 ms ab. Bei den Versuchspersonen, denen gemischte Zahlenpaare erst in der zweiten Sitzung präsentiert wurden, stieg die Reaktionszeitdifferenz von 16 ms am Ende der ersten Sitzung auf einen Wert von 62 ms zu Beginn der zweiten Sitzung an. Die Ergebnisse von Experiment 7 liefern somit einen Hinweis darauf, dass der Verzicht auf die Präsentation gemischter Zahlenpaare in Experiment 6 zum Verschwinden des Reaktionszeitunterschiedes zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren geführt haben könnte.

Als mögliche Erklärung für das Entstehen eines Reaktionszeitunterschiedes bei Präsentation gemischter Zahlenpaare wurde in Abschnitt 4.7.4 die konstante Realisierung der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ vorgeschlagen. Diese zieht bei Präsentation aller drei Zahlenpaararten eine häufigere Entscheidung für eine positive Zahl nach sich. Im Umkehrschluss impliziert diese Erklärung kürzere Reaktionszeiten für negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren, wenn anstelle der numerisch größeren stets die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden soll. Dann würde bei Präsentation aller drei Zahlenpaararten in 75 % der Durchgänge eine Entscheidung für eine Zahl mit einem Minuszeichen getroffen werden. Diese Vorhersage findet durch die in Abschnitt 5.3 schon kurz angesprochene numerische Vergleichsaufgabe von Tzelgov et al. (2009) empirische Unterstützung. Dort stellte die Instruktion eine *between-subjects* Variable dar. Die Autoren berichten, dass das numerische Urteil schneller für ein positives im Vergleich zu einem negativen Zahlenpaar abgegeben werden konnte, wenn während des gesamten Experiments die ‚größer'-Instruktion angewendet wurde. Umgekehrt ergab sich für die Versuchspersonengruppe, die während des gesamten Experiments die numerisch kleinere Zahl auswählte, kein Unterschied in den Reaktionszeiten positiver und negativer Zahlenpaare. Da jede Versuchsperson jedoch nur eine Sitzung mit vier Replikationen pro Zahlenpaar absolvierte, stellt sich die Frage, ob eine Erhöhung der Sitzungsanzahl einen Antwortvorteil bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare zur Folge haben könnte. In ihrem zweiten Experiment untersuchten Tzelgov et al., ob die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren durch die Vorzeichen zustande kommen. Dazu wurde das negative Zahlen kennzeichnende Vorzeichen entfernt und die Zahlen stattdessen farbig präsentiert. Beispielsweise entsprachen Zahlen in roter Schriftfarbe positiven Zahlen und Zahlen in blauer Schriftfarbe negativen Zahlen. In einer Lernphase, bestehend aus fünf Sitzungen mit insgesamt 3 600 Durchgängen, wurden Ungleichungen präsentiert, die verifiziert bzw. falsifiziert werden sollten. Die sechste Sitzung bildete die Testphase, in der es aus zwei gleichzeitig präsentierten (farbigen) Zahlen jeweils die numerisch kleinere (größere) Zahl auszuwählen galt. In der Versuchspersonengruppe mit der ‚größer'-Instruktion erfolgte die Antwortabgabe 80 ms schneller für positive Zahlenpaare. Hingegen konnte die Antwort in der Versuchspersonengruppe mit der ‚kleiner'-Instruktion 20 ms schneller auf negative Zahlenpaare abgegeben werden. Dieses Ergebnis untermauert noch einmal den Beitrag der gemischten Zahlenpaare am Zustandekommen von schnelleren Reaktionen auf positive oder negative Zahlenpaare.

Diese Argumentation, der Reaktionszeitunterschied hinge von der Präsentation gemischter Zahlenpaare sowie der Realisierung nur einer Instruktion ab, kann weder mit der Zahlenstrahl- noch mit der Interferenzannahme in Einklang gebracht werden. Gleichermaßen kann die Strategie der Reaktionsumkehr dieses Ergebnis nicht erklären, da bei Anwendung dieser der Unterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren zwar geringer, aber aufgrund des zusätzlichen Verarbeitungsschrittes (Umkehr der Reaktion) nie Null oder gar negativ werden dürfte. Zwar wurde für die Strategie der Instruktionsumkehr auch angenommen, dass die Umkehr der Instruktion einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt darstellt, diese Annahme kann jedoch nicht uneingeschränkt beibehalten werden (siehe Abschnitt 4.6.4). So wird die Konstanthaltung der Instruktion sowie die ausschließliche Präsentation positiver und negativer Zahlenpaare als Ursache dafür gesehen, dass die Vorzeichen als verlässliche Instruktionscues genutzt werden können. Demzufolge stehen zwei Pluszeichen für die Auswahl der numerisch größeren Zahl und zwei Minuszeichen für die Auswahl der absolut kleineren Zahl. Ein Reaktionszeitvorteil der jeweiligen Auswahl wäre in diesem Fall unplausibel.

Wird die Instruktion hingegen variiert, so dass die Vorzeichen keine verlässlichen Instruktionscues mehr darstellen, dann müsste sich wieder ein zeitlicher Nachteil bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare zeigen lassen. Dieser entsteht, weil die Versuchsperson die entsprechende Instruktion („Wähle die numerisch kleinere Zahl“ bzw. „Wähle die numerisch größere Zahl“) erst dann umformen kann (in „Wähle die absolut größere Zahl“ bzw. „Wähle die absolut kleinere Zahl“), wenn ihr die Instruktion mitgeteilt und ein negatives Zahlenpaar präsentiert wurde[11]. Das Ergebnismuster aus Experiment 8 entspricht dieser Vorhersage. Der Reaktionszeitunterschied betrug in diesem Experiment 89 ms. Auch Shaki und Petrusic (2005) variierten in ihrem Experiment unter Ausschluss gemischter Zahlenpaare die Instruktion und erhielten einen Reaktionszeitvorteil der positiven Zahlenpaare von 86 ms.

Eine zusammenfassende Darstellung aller Vorhersagen der Strategie der Instruktionsumkehr in Bezug auf den Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren sowie die zugehörige empirische Befundlage liefert Tabelle 5.2. Die Vorhersagen sind in Abhängigkeit von der Präsentation gemischter Zahlenpaare sowie der Variation bzw. Konstanthaltung der Instruktion aufgelistet. Daraus geht einerseits hervor, dass die Präsentation gemischter Zahlenpaare stets zu einem Reaktionszeitunterschied führt, der nur dann zugunsten der negativen Zahlenpaare ausfällt, wenn während des gesamten Experiments die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden soll. Andererseits entsteht immer dann ein Reaktionszeitnachteil für die Beantwortung negativer Zahlenpaare, wenn die Instruktion variiert wird. Tabelle 5.2 verdeutlicht, dass – bis auf eine Vorhersage – für alle Vorhersagen der Strategie der Instruktionsumkehr empirische Belege existieren. Somit ist die Strategie der Instruktionsumkehr geeignet, eine Erklärung für die unterschiedlichen Ausprägungen des Reaktionszeitunterschiedes zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren zu liefern.

Ein berechtigter Einwand könnte darin bestehen, alle Beziehungen der Reaktionszeiten zwischen

Tabelle 5.2

Vorhersagen zum Reaktionszeitunterschied zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren bei Anwendung der Strategie der Instruktionsumkehr sowie deren empirische Unterstützung

gemischte Zahlenpaare	Instruktion	Auswahl der … Zahl	Vorhersage	Empirische Befundlage
präsentiert	konstant	num. kleineren	$RT_{neg}^{a} < RT_{pos}^{b}$	Tzelgov et al. (2009, Exp. 2)
		num. größeren	$RT_{neg} > RT_{pos}$	Lochmann (2005) Experiment 5 d. v. A.[c] Tzelgov et al. (2009, Exp. 1–2)
	variabel		$RT_{neg} > RT_{pos}$	Fischer (2003)
¬ präsentiert	konstant	num. kleineren	$RT_{neg} = RT_{pos}$	
		num. größeren	$RT_{neg} = RT_{pos}$	Experiment 6 d. v. A.
	variabel		$RT_{neg} > RT_{pos}$	Shaki und Petrusic (2005) Experiment 8 d. v. A.

Anmerkung. num. = numerisch, *a*: RT_{neg} = Reaktionszeit auf negative Zahlenpaare, *b*: RT_{pos} = Reaktionszeit auf positive Zahlenpaare, *c*: d. v. A. = der vorliegenden Arbeit.

[11] Die zeitliche Trennung von Instruktion und Präsentation des Zahlenpaares ist dabei keineswegs zwingend. Dieselben Ergebnisse würde man für die gleichzeitige Präsentation von Instruktion und Zahlenpaar erwarten.

positiven und negativen Zahlenpaaren (siehe Tabelle 5.2) auf den Einfluss der gemischten Zahlenpaare zurückzuführen, wodurch die Interpretation im Sinne der Instruktionsumkehr nicht notwendig wäre. Dafür wären jedoch zwei zusätzliche Annahmen erforderlich. Einerseits müsste angenommen werden, dass für die Beantwortung negativer Zahlenpaare generell mehr Zeit benötigt wird, um erklären zu können, weshalb die variable Instruktion stets zu höheren Reaktionszeiten auf negative im Vergleich zu positiven Zahlen führt. Andererseits müsste angenommen werden, dass der Reaktionszeitnachteil bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare weniger stark ausgeprägt ist als der Effekt, der sich durch die Präsentation gemischter Zahlenpaare ergibt. Nur mit dieser zweiten Zusatzannahme könnten die Ergebnisse von Tzelgov et al. (2009) erklärt werden, der die Instruktion als *between-subjects* Variable realisierte und gemischte Zahlenpaare präsentierte. Die Autoren fanden, dass der Reaktionszeitvorteil für negative Zahlenpaare bei konstanter Anwendung der ‚kleiner'-Instruktion mit 20 ms weniger stark ausgeprägt war als der Reaktionszeitvorteil der positiven Zahlenpaare bei konstanter Anwendung der ‚größer'-Instruktion mit 80 ms. Andererseits könnte damit erklärt werden, weshalb der Reaktionszeitunterschied in Experiment 6 (ohne gemischte Zahlenpaare bei konstanter Instruktion) zwar auf ein nicht signifikantes Niveau sank, aber mit 17 ms dennoch zugunsten der positiven Zahlenpaare ausfiel.

Gerade dieses letzte Ergebnis muss jedoch mit Vorsicht interpretiert werden. Zwar ergab sich im Mittel tatsächlich eine Reaktionszeitdifferenz von 17 ms, diese kam jedoch allein durch zwei Versuchspersonen zustande, die während des gesamten Experiments deutlich schneller auf positive im Vergleich zu negativen Zahlenpaaren reagierten. Bei den restlichen Versuchspersonen verschwand der Reaktionszeitunterschied in der ersten Sitzung und kehrte sich teilweise sogar zugunsten der negativen Zahlenpaare um. Dies dürfte bei Annahme eines generellen Reaktionszeitnachteiles bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare nicht auftreten. Des Weiteren beinhaltet die Alternativerklärung zwei Zusatzannahmen, wohingegen die Erklärung mittels Strategie der Instruktionsumkehr ohne Zusatzannahmen auskommt. Schließlich müsste selbst bei Gültigkeit der alternativen Erklärung mittels Einfluss der gemischten Zahlenpaare angegeben werden, wie die Auswahl der numerisch größeren oder kleineren Zahl eines negativen Zahlenpaares erfolgt und auf welche mentale Repräsentation währenddessen zugegriffen wird. Diese Argumente sollen genügen, um die Alternativerklärung, die Reaktionszeitunterschiede könnten stets auf die gemischten Zahlenpaare zurückgeführt werden, zurückzuweisen.

5.6 Der semantische Kongruenzeffekt

Mit Hilfe der beiden Experimente zum Einfluss der artikulatorischen Unterdrückung können die Hypothesen zum semantischen Kongruenzeffekt überprüft werden. Der semantische Kongruenzeffekt besagt, dass aus zwei numerisch kleinen positiven Zahlen schneller die numerisch kleinere als die numerisch größere Zahl ausgewählt werden kann. Aus zwei numerisch großen positiven Zahlen erfolgt die Auswahl der numerisch größeren Zahl schneller als die Auswahl der numerisch kleineren Zahl. Für die Überprüfung des semantischen Kongruenzeffekts im Bereich der negativen Zahlen werden einerseits die Ergebnisse aus Experiment 6 herangezogen. Andererseits ermöglicht die Variation der Instruktion in Experiment 8 die Betrachtung des semantischen Kongruenzeffekts getrennt für positive und negative Zahlenpaare. Die Vorhersagen der einzelnen Annahmen zum semantischen Kongruenzeffekt fasst Tabelle 5.3 noch einmal zusammen.

Bei Gültigkeit der Zahlenstrahlannahme ist die numerische Größe der beiden Zahlen für den semantischen Kongruenzeffekt entscheidend. Demzufolge sollte die numerisch kleinere Zahl schneller aus zwei numerisch kleinen negativen Zahlen und die numerisch größere Zahl schneller aus zwei numerisch großen negativen Zahlen bestimmt werden.

In der Interferenzannahme wird davon ausgegangen, dass Versuchspersonen numerisch große negative Zahlen als subjektiv kleine Zahlen auffassen. Deshalb sollte für diese Zahlen schneller unter der „Wähle die numerisch kleinere Zahl“-Instruktion geantwortet werden. Werden hingegen zwei numerisch kleine Zahlen präsentiert, die für die Versuchsperson als subjektiv groß gelten, dann sollte das numerische Urteil schneller unter der „Wähle die numerisch größere Zahl“-Instruktion abgegeben werden.

Für die beiden Strategien ist die absolute numerische Größe der negativen Zahlen für das numeri-

Tabelle 5.3

Vorhersagen der Ergebnisse zum semantischen Kongruenzeffekt getrennt für die einzelnen Annahmen am Beispiel zweier negativer Zahlenpaare

Zahlenpaar	Größenstatus	vom VL vorgegebene Instruktion	Verhalten der Vp	RT-Vorhersage in Abhängigkeit von der Instruktion
	Zahlenstrahlannahme:			
−1 −2	num. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt num. kleinere	$RT_{kl}{}^{a} > RT_{gr}{}^{b}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt num. größere	
	Interferenzannahme:			
	abs. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt num. kleinere	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt num. größere	
	Strategie der Reaktionsumkehr:			
	abs. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. kleinere*	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. größere*	
	Strategie der Instruktionsumkehr:			
	abs. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. größere	$RT_{kl} > RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. kleinere	
	Zahlenstrahlannahme:			
−8 −9	num. klein	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt num. kleinere	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt num. größere	
	Interferenzannahme:			
	abs. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt num. kleinere	$RT_{kl} > RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt num. größere	
	Strategie der Reaktionsumkehr:			
	abs. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. kleinere*	$RT_{kl} > RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. größere*	
	Strategie der Instruktionsumkehr:			
	abs. groß	„wähle die num. kleinere Zahl“	wählt abs. größere	$RT_{kl} < RT_{gr}$
		„wähle die num. größere Zahl“	wählt abs. kleinere	

Anmerkung. VL = Versuchsleiter, Vp = Versuchsperson, num. = numerisch, abs. = absolut, $*$ = mit anschließender Umkehr der Reaktion, *a*: RT_{kl} = Reaktionszeit unter der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl“, *b*: RT_{gr} = Reaktionszeit unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“.

sche Urteil ausschlaggebend. Wendet die Versuchsperson die Strategie der Reaktionsumkehr an, dann erfolgt anstelle der Auswahl der numerisch kleineren Zahl die Auswahl der absolut kleineren Zahl mit anschließender Reaktionsumkehr. Demzufolge kann aus zwei numerisch großen (absolut kleinen) Zahlen schneller die numerisch kleinere Zahl ausgewählt werden. Umgekehrt wird anstelle der numerisch größeren Zahl die absolut größere Zahl mit anschließender Reaktionsumkehr bestimmt. Dadurch kann aus zwei numerisch kleinen (absolut großen) Zahlen die Auswahl der numerisch größeren Zahl schneller erfolgen.

Schließlich wird bei Anwendung der Strategie der Instruktionsumkehr der größer-kleiner-Status der Instruktion umgekehrt. Die Auswahl der numerisch kleineren (größeren) Zahl geschieht durch die Bestimmung der absolut größeren (kleineren) Zahl. Deshalb führt die Präsentation eines numerisch großen negativen Zahlenpaares zur schnelleren Auswahl der numerisch größeren (und damit absolut kleineren) Zahl und die Präsentation eines numerisch kleinen negativen Zahlenpaares zur schnelleren Auswahl der numerisch kleineren (und damit absolut größeren) Zahl des Zahlenpaares.

Da der nicht-signifikante Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren in Experiment 6 unerwartet auftrat, wurden zum semantischen Kongruenzeffekt *a priori* keine Hypothesen formuliert. Dennoch können die Ergebnisse zu den Vorhersagen der einzelnen Annahmen in Beziehung gesetzt werden. In diesem Experiment wurden für Zahlenpaare, deren Summen der Absolutbeträge Werten kleiner 7 entsprachen, kürzere Reaktionszeiten gefunden, wenn das Zahlenpaar aus zwei negativen (z. B. −1 −2) im Vergleich zu zwei positiven Zahlen (z. B. 1 2) bestand. Damit gelang zum ersten Mal der Nachweis, dass der Vergleich der Reaktionszeiten von negativen und positiven Zahlenpaaren, die identische Absolutwerte aufweisen, zugunsten der negativen Zahlenpaare ausfallen kann. Mit den Ausführungen aus Abschnitt 5.5 sollte deutlich geworden sein, dass sowohl die Zahlenstrahl- und die Interferenzannahme als auch die Strategieannahme der Reaktionsumkehr stets größere Reaktionszeiten für negative im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren vorhersagen. Dadurch sind die kürzeren Reaktionszeiten auf negative Zahlenpaare für Summen der Absolutbeträge < 7 in Experiment 6 mit jeder dieser drei Annahmen unvereinbar. Erneut liefert lediglich die Strategie der Instruktionsumkehr einen plausiblen Erklärungsansatz. Ausgangspunkt ist die Verwendung der Vorzeichen als Instruktionscue, das der Versuchsperson angibt, aus zwei negativen Zahlen stets die absolut kleinere und aus zwei positiven Zahlen stets die numerisch größere Zahl auszuwählen. Mit dem semantischen Kongruenzeffekt lässt sich nun erklären, dass aus zwei absolut kleinen Zahlen (z. B. −1 −2) schneller die absolut kleinere Zahl ausgewählt werden kann als aus zwei numerisch kleinen Zahlen (z. B. 1 2) die numerisch größere. Ein umgekehrtes Muster der Reaktionszeiten müsste für numerisch kleine negative Zahlen (z. B. −9 −8) im Vergleich zu numerisch großen positiven Zahlen (z. B. 8 9) entstehen, was in Experiment 6 in der Tat gezeigt wurde.

In Experiment 8 reagierten Versuchspersonen bei Präsentation eines positiven Zahlenpaares generell schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch größere Zahl“ und bei Präsentation eines negativen Zahlenpaares generell schneller unter der Instruktion „Wähle die numerisch kleinere Zahl“. Diese Ergebnisse stimmen mit den Daten von Fischer (2003) sowie Shaki und Petrusic (2005) überein. Ferner hingen die kürzeren Reaktionszeiten, die sich für die jeweilige Zahlenpaarart ergaben, systematisch von der Summe der beiden Zahlen ab. Je größer die Summe zweier positiver Zahlen war, desto schneller konnte die numerisch größere im Vergleich zur numerisch kleineren Zahl bestimmt werden. Gleichermaßen wurde die numerisch kleinere Zahl umso schneller aus zwei negativen Zahlen ausgewählt, je numerisch kleiner die Summe der beiden Zahlen eines Zahlenpaares war. Mit einem Blick auf Tabelle 5.3 wurde dieses Ergebnis sowohl mit der Zahlenstrahlannahme als auch mit der Strategieannahme der Instruktionsumkehr vorhergesagt. Dagegen wurde mit der Interferenzannahme und der Strategieannahme der Reaktionsumkehr ein umgekehrtes Reaktionszeitmuster erwartet. Für die Strategie der Instruktionsumkehr bedeutet es, dass die numerisch kleinere Zahl schneller aus zwei numerisch kleinen Zahlen bestimmt werden kann, weil dafür die absolut größere Zahl aus zwei absolut großen Zahlen ausgewählt wird.

5.7 Fazit

Es bleibt festzuhalten, dass die *Zahlenstrahlannahme* durch die Ergebnisse zum numerischen Größenkongruenzeffekt widerlegt wurde. Numerisch kleine negative Zahlen bzw. numerisch große negative Zahlen werden nicht als ‚kleine' bzw. ‚große' numerische Größen aufgefasst. Damit kann die Zahlenstrahlannahme auch nicht als Erklärung des Ergebnisses zum semantischen Kongruenzeffekt dienen, aus zwei numerisch kleinen negativen Zahlen schneller die numerisch kleinere Zahl auszuwählen.

Die aus der Zahlenstrahlannahme abgeleitete *Interferenzannahme*, mit der die Existenz eines negativen mentalen Zahlenstrahls beibehalten werden könnte, ist auch nicht in der Lage, die Ergebnisse aller Experimente zum numerischen Vergleich zweier gleichzeitig präsentierter negativer Zahlen zu erklären. Lediglich der umgekehrte Größenkongruenzeffekt sowie die ausbleibende Wirkung artikulatorischer Unterdrückung wurde mit dieser Annahme vorhergesagt. Darüber hinaus stimmen die Vorhersagen der Interferenzannahme nicht mit den Ergebnissen der durchgeführten Experimente überein.

Außerdem sollte deutlich geworden sein, dass – bis auf den umgekehrten Größenkongruenzeffekt – keines der Ergebnisse mit der *Strategie der Reaktionsumkehr* in Einklang zu bringen ist. Insbesondere der Reaktionszeitvorteil der bei der Beantwortung negativer Zahlenpaare im Vergleich zu positiven Zahlenpaaren entstand, stellt für diese Strategieannahme ein nicht lösbares Problem dar.

Lediglich die *Strategie der Instruktionsumkehr* ist in der Lage, die Ergebnisse zum Größenkongruenzeffekt, zum Reaktionszeitunterschied zwischen positiven und negativen Zahlenpaaren sowie zum semantischen Kongruenzeffekt zu erklären. Zusätzlich konnten die unterschiedlichen Vorhersagen zur Ausprägung des Reaktionszeitunterschiedes zwischen negativen und positiven Zahlenpaaren, die sich aus dieser Strategieannahme ergeben, empirisch belegt werden. Die Ergebnisse aller durchgeführten Experimente werden als ausreichende Evidenz dafür erachtet, dass beim numerischen Vergleich negativer Zahlen die Strategie der Instruktionsumkehr angewendet wird. Sind Versuchspersonen aufgefordert, die numerisch größere zweier negativer Zahlen zu bestimmen, so wählen sie die absolut kleinere Zahl aus. Lautet die Instruktion jedoch, sich für die numerisch kleinere Zahl zu entscheiden, so geschieht dies anhand der Auswahl der absolut größeren Zahl. Somit besitzen negative Zahlen keine eigenständigen mentalen Größenrepräsentationen. Vielmehr kann aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit geschlussfolgert werden, dass während des numerischen Vergleiches negativer Zahlen die Absolutbeträge der negativen Zahlen mental repräsentiert werden, was wiederum bedeutet, dass der numerische Vergleich negativer Zahlen auf den mentalen Repräsentationen der positiven Zahlen beruht. Bei der Strategie könnte es sich um eine Selbstinstruktion handeln, die anhand der Minuszeichen abgerufen wird. Aktives Verbalisieren konnte in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht nachgewiesen werden.

5.8 Ausblick

Die Bestimmung der numerisch größeren zweier rationaler Zahlen stellt eine beeindruckende Parallele zur Bestimmung der numerisch größeren zweier negativer Zahlen dar. Positive rationale Zahlen der Form $\frac{1}{x}$ besitzen die Eigenschaft, dass ihre numerische Größe mit der numerischen Größe x ihres Nenners negativ korreliert ist[12]: Je größer der numerische Wert des Nenners, desto kleiner die positive rationale Zahl. Zur Auswahl der numerisch größeren Zahl des Zahlenpaares $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{7}$ könnten deshalb verschiedene Strategien eingesetzt werden. Dabei bestünde einerseits die Möglichkeit, sich für die Zahl zu entscheiden, deren Nenner den numerisch kleineren Wert aufweist. Diese Strategie erinnert an die Strategie der Instruktionsumkehr, die beim numerischen Vergleich negativer Zahlen angenommen wird. Andererseits könnte die Versuchsperson zunächst den Nenner mit dem numerisch größeren Wert bestimmen. Zur Auswahl der korrekten Antwort müsste dann jedoch die andere Taste bedient werden. Dies ist mit der Strategie der Reaktionsumkehr gleichzusetzen. In keinem Artikel zum numerischen Vergleich rationaler Zahlen wurde bisher zwischen der Strategie der Instruktionsumkehr und der Strategie der Reaktionsumkehr unterschieden. Allerdings gleichen die Schlussfolgerungen zum numerischen Vergleich rationaler Zahlen den Schlussfolgerungen des numerischen Vergleiches negativer Zahlen.

Kallai und Tzelgov (2009) präsentierten ihren Versuchspersonen Zahlenpaare, die aus natürlichen Zahlen (1 bis 9) bzw. rationalen Zahlen ($\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{9}$) bestehen konnten. Somit gab es Zahlenpaare mit zwei natürlichen Zahlen, Zahlenpaare mit zwei rationalen Zahlen sowie Zahlenpaare, die aus einer natürlichen und einer rationalen Zahl bestanden. Die Einteilung der letzteren Zahlenpaarart in numerisch kongruent (z. B. $\frac{1}{3}$ 5) sowie numerisch inkongruent (z. B. $\frac{1}{7}$ 5) lehnt sich an die Einteilung gemischter Zahlenpaare an. Die Instruktion wurde als *between-subjects* Variable realisiert. Obgleich der numerischen Vergleichsaufgabe eine physikalische Vergleichsaufgabe vorausging, seien nachfolgend nur die Ergebnisse der numerischen Vergleichsaufgabe berichtet. Es ließ sich eine Abhängigkeit der Reaktionszeiten von der numerischen Differenz zweier rationaler Zahlen feststellen. Allerdings wurde eine höhere Varianzaufklärung für die numerische Differenz der numerischen Größen der Nenner gefunden. Des Weiteren produzierten Versuchspersonen bei Zahlenpaaren mit zwei rationalen Zahlen die größten und bei gemischten Zahlenpaaren die kürzesten Reaktionszeiten. Für letztere Zahlenpaarart entstanden für numerisch kongruente im Vergleich zu numerisch inkongruenten Zahlenpaaren kürzere Reaktionszeiten, was auf den Einfluss der irrelevanten numerischen Größe des Nenners zurückzuführen ist. Die Autoren gelangen zu der Schlussfolgerung, dass die Versuchspersonen die Strategie „judging the denominator value as an indicator for the inverse value of the fraction (and therefore judging the smaller denominator as the larger fraction)“ (S. 1852) angewendet haben. Diese Strategiebeschreibung entspricht im Grunde genommen der Strategie der Instruktionsumkehr, die für den numerischen Vergleich negativer Zahlen postuliert wurde. Zu ähnlichen Ergebnissen und Schlussfolgerungen gelangen

[12] Für die Werte $2 \leq x \leq 9$ beträgt die Korrelation $r = -.911$.

auch Bonato, Fabbri, Umiltà und Zorzi (2007) mit einem Experiment zum numerischen Vergleich rationaler Zahlen der Form $\frac{1}{x}$ ($1 \leq x \leq 9$, wobei $x \neq 5$) mit der Standardzahl $\frac{1}{5}$. Die Autoren berichten u. a. einen SNARC-Effekt, der von der numerischen Größe der Nenner abhängig war: Auf numerisch kleine rationale Zahlen (z. B. $\frac{1}{9}$) konnten die Antworten 45 ms schneller mit der rechten Antwortseite und auf numerisch große rationale Zahlen (z. B. $\frac{1}{2}$) 46 ms schneller mit der linken Antwortseite abgegeben werden.

Die Darstellung der Experimente von Kallai und Tzelgov (2009) und Bonato et al. (2007) zeigt, dass es sich beim numerischen Vergleich rationaler und beim numerischen Vergleich negativer Zahlen um strukturell ähnliche Aufgaben handelt, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Ferner gleicht die von Kallai und Tzelgov beschriebene Strategie, die zur Auswahl der numerisch größeren zweier rationaler Zahlen eingesetzt wird, der Strategie der Instruktionsumkehr, die in der vorliegenden Arbeit für den numerischen Vergleich negativer Zahlen angenommen wird. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zum numerischen Vergleich negativer und rationaler Zahlen kann in zukünftigen Untersuchungen zusätzlich Aufschluss über die Anwendung von Strategien geben. Insbesondere der semantische Kongruenzeffekt kann dazu genutzt werden, die Parallelen der eingesetzten Strategien bei der Beurteilung negativer Zahlen im Vergleich zur Beurteilung rationaler Zahlen weiter auszuarbeiten.

Literaturverzeichnis

Bachot, J., Gevers, W., Fias, W. & Roeyers, H. (2005). Number sense in children with visuospatial disabilities: Orientation of the mental number line. *Psychology Science, 47,* 172–183.

Baddeley, A. D., Chincotta, D. & Adlam, A. (2001). Working memory and the control of action: Evidence from task switching. *Journal of Experimental Psychology: General, 130,* 641–657. doi:10.1037//0096-3445.130.4.641

Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working memory. In K. Spence & J. T. Spence (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 8, S. 67–89). New York, NY: Academic Press.

Baddeley, A. D. & Lieberman, K. (1980). Spatial working memory. In R. S. Nickerson (Hrsg.), *Attention and performance VIII* (S. 521–539). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Baechtold, D., Baumueller, M. & Brugger, P. (1998). Stimulus-response compatibility in representational space. *Neuropsychologia, 36,* 731–735. doi:10.1016/S0028-3932(98)00002-5

Banks, W. P. (1977). Encoding and processing of symbolic information in comparative judgements. In G. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 11, S. 101–159). New York, NY: Academic Press.

Banks, W. P. & Flora, J. (1977). Semantic and perceptual processes in symbolic comparisons. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 3,* 278–290.

Banks, W. P., Fujii, M. & Kayra-Stuart, F. (1976). Semantic congruity effects in comparative judgments of magnitude of digits. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2,* 435–447.

Banks, W. P. & Hill, D. K. (1974). The apparent magnitude of number scaled by random production. *Journal of Experimental Psychology: Monograph, 102,* 353–376.

Bauer, D. W. & Miller, J. (1982). Stimulus-response compatibility and the motor system. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology, 34,* 367–380. doi:10.1080/14640748208400849

Berch, D. B., Krikorian, R. & Huha, E. M. (1998). The Corsi block-tapping task: Methodological and theoretical considerations. *Brain and Cognition, 38,* 317–338. doi:10.1006/brcg.1998.1039

Birnbaum, M. H. & Jou, J. W. (1990). A theory of comparative response times and “difference” judgements. *Cognitive Psychology, 22,* 184–210. doi:10.1016/0010-0285(90)90015-V

Blankenberger, S. (1992). *Simulation mentaler Vergleiche mit neuronalen Netzwerken*. Unveröffentlichte Dissertation, TU-Braunschweig.

Bonato, M., Fabbri, S., Umiltà, C. & Zorzi, M. (2007). The mental representation of numerical fractions: Real or integer? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 33,* 1410–1419. doi:10.1037/0096-1523.33.6.1410

Bruyer, R. & Scailquin, J. C. (1998). The visuospatial sketchpad for mental images: Testing the multicomponent model of working memory. *Acta Psychologica, 98,* 17–36. doi:10.1016/S0001-6918(97)00053-X

Bryck, R. L. & Mayr, U. (2005). On the role of verbalization during task set selection: Switching or serial order control? *Memory & Cognition, 33,* 611–623.

Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General, 124,* 434–452. doi:10.1037/0096-3445.124.4.434

Buckley, P. B. & Gillman, C. B. (1974). Comparisons of digits and dot patterns. *Journal of Experimental Psychology, 103,* 1131–1136.

Bull, R., Marschark, M. & Blatto-Vallee, G. (2005). SNARC-hunting: Examining number representation in deaf students. *Learning and Individual Differences, 15,* 223–236. doi:10.1016/j.lindif.2005.01.004

Busemeyer, J. R. & Diederich, A. (2010). *Cognitive modelling*. Los Angeles, CA: Sage Publications.

Damian, M. F. (2001). Congruity effects evoked by subliminally presented primes: Automaticity rather than semantic processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27,* 154–165. doi:10.1037/0096-1523.27.1.154

DeCruz, H. (2006). Why are some numerical concepts more successful than others? An evolutionary perspective on the history of number concepts. *Evolution and Human Behavior, 27,* 306–323. doi:10.1016/j.evolhumbehav.2006.02.001

Dehaene, S. (1989). The psychophysics of numercial comparison: A reexamination of apparently incompatible data. *Perception & Psychophysics, 45,* 557–566.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition, 44,* 1–42. doi:10.1016/0010-0277(92)90049-N

Dehaene, S. (1997). *The number sense: How the mind creates mathematics.* New York, NY: Oxford University Press.

Dehaene, S. & Akhavein, R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 21,* 314–326. doi:10.1037/0278-7393.21.2.314

Dehaene, S., Bossini, S. & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General, 122,* 371–396. doi:10.1037/0096-3445.122.3.371

Dehaene, S., Dupoux, E. & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16,* 626–641. doi:10.1037/0096-1523.16.3.626

Dehaene, S. & Naccache, L. (2001). Towards a cognitive neuroscience of consciousness: Basic evidence and a workspace framework. *Cognition, 79,* 1–37. doi:10.1016/S0010-0277(00)00123-2

Dehaene, S., Naccache, L., Le Clec'H, G., Koechlin, E., Mueller, M., Dehaene-Lambertz, G. et al. (1998). Imaging unconscious semantic priming. *Nature, 395,* 597–600. doi:10.1038/26967

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology, 20,* 487–506. doi:10.1080/02643290244000239

Denis, M. & Zimmer, H. D. (1992). Analog properties of cognitive maps constructed from verbal descriptions. *Psychological Research, 54,* 286–298. doi:10.1007/BF01358266

Dijck, J.-P. van, Gevers, W. & Fias, W. (2009). Numbers are associated with different types of spatial information depending on the task. *Cognition, 113,* 248–253. doi:10.1016/j.cognition.2009.08.005

Duncan, E. M. & McFarland, C. E. (1980). Isolating the effects of symbolic distance and semantic congruity in comparative judgments: An additive-factors analysis. *Memory & Cognition, 8,* 612–622.

Emerson, M. J. & Miyake, A. (2003). The role of inner speech in task switching: A dual-task investigation. *Journal of Memory and Language, 48,* 148–168. doi:10.1016/S0749-596X(02)00511-9

Farmer, E. W., Berman, J. V. F. & Fletcher, Y. L. (1986). Evidence for a visuo-spatial scratch-pad in working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 38A,* 675–688. doi:10.1080/14640748608401620

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G. & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods, 39,* 175–191.

Feigenson, L., Dehaene, S. & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences, 8,* 307–314. doi:10.1016/j.tics.2004.05.002

Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: Evidence from the SNARC effect. *Psychological Research, 65,* 250–259. doi:10.1007/s004260100065

Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F. & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition, 2,* 95–110. doi:10.1080/135467996387552

Fias, W. & Fischer, M. H. (2005). Spatial representations of numbers. In J. I. D. Campbell (Hrsg.), *Handbook of mathematical cognition* (S. 43–54). New York, NY: Psychology Press.

Fischer, M. H. (2003). Cognitive representation of negative numbers. *Psychological Science, 14,* 278–282. doi:10.1111/1467-9280.03435

Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D. & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience, 6,* 555–556. doi:10.1038/nn1066

Fischer, M. H. & Rottmann, J. (2005). Do negative numbers have a place on the mental number line? *Psychology Science, 47,* 22–32.

Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L. & Fias, W. (2004). Oculomotor bias induced by number perception. *Experimental Psychology, 51,* 91–97. doi:10.1027/1618-3169.51.2.91

Galfano, G., Rusconi, E. & Umiltà, C. (2006). Number magnitude orients attention, but not against one's will. *Psychonomic Bulletin & Review, 13,* 869–874.

Gallistel, C. R. & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition, 44,* 43–74. doi:10.1016/0010-0277(92)90050-R

Gallistel, C. R. & Gelman, R. (2000). Non-verbal numerical cognition: From reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences, 4,* 59–65. doi:10.1016/S1364-6613(99)01424-2

Ganor-Stern, D. & Tzelgov, J. (2008). Negative numbers are generated in the mind. *Experimental Psychology, 55,* 157–163. doi:10.1027/1618-3169.55.3.157

Gevers, W., Ratinckx, E., De Baene, W. & 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. doi:10.1027/1618-3169.55.3.157

Gevers, W., Reynvoet, B. & Fias, W. (2003). The mental number representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition, 87,* B87–B95. doi:10.1016/S0010-0277(02)00234-2

Gevers, W., Reynvoet, B. & Fias, W. (2004). The mental number representation of ordinal sequences is spatially organized: Evidence from days of the week. *Cortex, 40,* 171–172. doi:10.1016/S0010-9452(08)70938-9

Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B. & Fias, W. (2006). Numbers and space: A computational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 32,* 32–44. doi:10.1037/0096-1523.32.1.32

Gyselinck, V., De Beni, R., Pazzaglia, F., Meneghetti, C. & Mondoloni, A. (2007). Working memory components and imagery instructions in the elaboration of a spatial mental model. *Psychological Research, 71,* 373–382. doi:10.1007/s00426-006-0091-1

Henik, A. & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: The relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory & Cognition, 10,* 389–395.

Herrera, A., Macizo, P. & Semenza, C. (2008). The role of working memory in the association between number magnitude and space. *Acta Psychologica, 128,* 225–237. doi:10.1016/j.actpsy.2008.01.002

Hinrichs, J. V., Berie, J. L. & Mosell, M. K. (1982). Place information in multidigit number comparison. *Memory & Cognition, 10,* 487–495.

Hinrichs, J. V., Yurko, D. S. & Hu, J.-M. (1981). Two-digit number comparison: Use of place information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 7,* 890–901.

Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P. & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience, 6,* 435–448. doi:10.1038/nrn1684

Hung, Y.-H., Hung, D. L., Tzeng, O. J.-L. & Wu, D. H. (2008). Flexible spatial mapping of different notations of numbers in Chinese readers. *Cognition, 106,* 1441–1450. doi:10.1016/j.cognition.2007.04.017

Ifrah, G. (1991). *Universalgeschichte der Zahlen* (2. Aufl.). Frankfurt/Main: Campus Verlag.

Ito, Y. & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: Evidence from the SNARC effect. *Memory & Cognition, 32,* 662–673.

Jamieson, D. G. & Petrusic, W. M. (1975). Relational judgments with remembered stimuli. *Perception & Psychophysics, 18,* 373–378.

Jones, D., Farrand, P., Stuart, G. & Morris, N. (1995). Functional equivalence of verbal and spatial information in serial short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 21,* 1008–1018. doi:10.1037/0278-7393.21.4.1008

Kallai, A. Y. & Tzelgov, J. (2009). A generalized fraction: An entity smaller than one on the mental number line. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35,* 1845–1864. doi:10.1016/0010-0277(92)90050-R

Keus, I. M., Jenks, K. M. & Schwarz, W. (2005). Psychophysiological evidence that the SNARC effect has its functional locus in a response selection stage. *Cognitive Brain Research, 24,* 48–56. doi:10.1016/j.cogbrainres.2004.12.005

Keus, I. M. & Schwarz, W. (2005). Searching for the functional locus of the SNARC effect: Evidence for a response-related origin. *Memory & Cognition, 33,* 681–695.

Koechlin, E., Naccache, L., Block, E. & 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. doi:10.1037/0096-1523.25.6.1882

Kornblum, S., Hasbroucq, T. & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus-response compatibility – A model and taxonomy. *Psychological Review, 97,* 253–270. doi:10.1037/0033-295X.97.2.253

Kosslyn, S. M., Ball, T. M. & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 4,* 47–60. doi.10.1037/0096-1523.4.1.47.

Krueger, L. E. (1982). Single judgments of numerosity. *Perception & Psychophysics, 31,* 175–182.

Link, S. (1990). Modeling imageless thought: The relative judgment theory of numerical comparison. *Journal of Mathematical Psychology, 34,* 2–41. doi:10.1016/0022-2496(90)90010-7

Lochmann, K. (2005). *Numerischer Vergleich negativer Zahlen.* Unveröffentlichte Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).

Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review, 95,* 492–527. doi:10.1037/0033-295X.95.4.492

Lorch, R. F. & Myers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 16,* 149–157. doi:10.1037/0278-7393.16.1.149

Maki, R. H., Maki, W. S. & Marsh, L. G. (1977). Processing locational and orientional information. *Memory & Cognition, 5,* 602–612.

Malle, G. (1996). Ein Lehrgang über negative Zahlen. *Didaktikheft der Österreichischen Mathematischen Gesellschaft, 26,* 142–151.

Mapelli, D., Rusconi, E. & Umiltà, C. (2003). The SNARC effect: An instance of the Simon effect? *Cognition, 88,* B1–10. doi:10.1016/S0010-0277(03)00042-8

Meng, X. L., Rosenthal, R. & Rubin, D. B. (1992). Comparing correlated correlation coefficients. *Psychological Bulletin, 111*, 172–175. doi:10.1037/0033-2909.111.1.172

Miyake, A., Emerson, M. J., Padilla, F. & Ahn, J.-C. (2004). Inner speech as a retrieval aid for task goals: The effects of cue type and articulatory suppression in the random task cuing paradigm. *Acta Psychologica, 115*, 123–142. doi:10.1016/j.actpsy.2003.12.004

Müller, D. & Schwarz, W. (2007a). Exploring the mental number line: Evidence from a dual-task paradigm. *Psychological Research, 71*, 598–613. doi:10.1007/s00426-006-0070-6

Müller, D. & Schwarz, W. (2007b). Is there an internal association of numbers to hands? The task set influences the nature of the SNARC effect. *Memory & Cognition, 35*, 1151–1161.

Moyer, R. S. (1973). Comparing objects in memory: Evidence suggesting an internal psychophysics. *Perception & Psychophysics, 13*, 180–184.

Moyer, R. S. & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature, 215*, 1519-1520. doi:10.1038/2151519a0

Naccache, L., Blandin, E. & Dehaene, S. (2002). Unconscious masked priming depends on temporal attention. *Psychological Science, 13*, 416–424. doi:10.1111/1467-9280.00474

Neter, J., Wasserman, W. & Kutner, M. H. (1990). *Applied linear statistical models* (3. Aufl.). Burr Ridge, IL: Irwin.

Nieder, A. (2006). Neurobiologische Grundlagen der Zahlenverarbeitung. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hrsg.), *Neuropsychologie* (2. Aufl., S. 391–399). Berlin: Springer.

Nieder, A. & Miller, E. K. (2003). Coding of cognitive magnitude: Compressed scaling of numerical information in the primate prefrontal cortex. *Neuron, 37*, 149–157. doi:10.1016/S0896-6273(02)01144-3

Nieder, A. & Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 101*, 7457–7462. doi:10.1073/pnas.0402239101

Noordzij, M. L. & Postma, A. (2005). Categorical and metric distance information in mental representations derived from route and survey descriptions. *Psychological Research, 69*, 221–232. doi:10.1007/s00426-004-0172-y

Nuerk, H. C., Bauer, F., Krummenacher, J., Heller, D. & Willmes, K. (2005). The power of the mental number line: How the magnitude of unattended numbers affects performance in an Eriksen task. *Psychology Science, 47*, 34–50.

Nuerk, H. C., Iversen, W. & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology, 57*, 835–863. doi:10.1080/02724980343000512

Nuerk, H. C., Weger, U. & Willmes, K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition, 82*, B25–B33. doi:10.1016/S0010-0277(01)00142-1

Oeffelen, M. van & Vos, P. G. (1982). A probabilistic model for the discrimination of visual number.

Perception & Psychophysics, 32, 163–170.

Pansky, A. & Algom, D. (1999). Stroop and Garner effects in comparative judgement of numerals: The role of attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 25*, 39–58. doi:10.1037/0096-1523.25.1.39

Parkman, J. M. (1971). Temporal aspects of digit and letter inequality judgments. *Journal of Experimental Psychology, 91*, 191–205.

Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Bihan, D. L. & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron, 44*, 547–555. doi:10.1016/j.neuron.2004.10.014

Platt, J. R. & Johnson, D. M. (1971). Localization of position within a homogeneous behavior chain: Effects of error contingencies. *Learning and Motivation, 2*, 386–414. doi:10.1016/0023-9690(71)90020-8

Poltrock, S. E. (1989). A random walk model of digit comparison. *Journal of Mathematical Psychology, 33*, 131–162. doi:10.1016/0022-2496(89)90027-8

Proctor, R. W. & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin, 132*, 416–442. doi:10.1037/0033-2909.132.3.416

Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin, 86*, 446–461.

Rehkaemper, K. (1995). Analoge Repräsentationen. In K. Sachs-Hornbach (Hrsg.), *Bilder im Geiste: Zur kognitiven und erkenntnistheoretischen Funktion piktoraler Repräsentationen.* Amsterdam: Rodopi.

Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology, 83*, 274–278. doi:10.1037/h0028573

Reynvoet, B. & Brysbaert, M. (1999). Single-digit and two-digit Arabic numerals address the same semantic number line. *Cognition, 72*, 191–201. doi:10.1016/S0010-0277(99)00048-7

Reynvoet, B., Brysbaert, M. & Fias, W. (2002). Semantic priming in number naming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology, 55*, 1127–1139. doi:10.1080/02724980244000116

Reynvoet, B., Caessens, B. & Brysbaert, M. (2002). Automatic stimulus-response associations may be semantically mediated. *Psychonomic Bulletin & Review, 9*, 107–112.

Ristic, J., Wright, A. & Kingstone, A. (2006). The number line effect reflects top-down control. *Psychonomic Bulletin & Review, 13*, 862–868.

Rosenberger, J. L. & Gasko, M. (1983). Comparing location estimators: Trimmed means, medians, and trimean. In D. C. Hoaglin, F. Mosteller & W. Tukey (Hrsg.), *Understanding robust and exploratory data analysis* (S. 297–338). New York, NY: Wiley.

Rubinsten, O. & Henik, A. (2002). Is an ant larger than a lion? *Acta Psychologica, 111*, 141–154. doi:10.1016/S0001-6918(02)00047-1

Saeki, E. (2007). Phonological loop and goal maintenance: Effect of articulatory suppression in number-size consistency task. *Psychologia, 50,* 122–131. doi:10.2117/psysoc.2007.122

Santiago, J., Lupiáñez, J., Pérez, E. & Funes, M. J. (2007). Time (also) flies from left to right. *Psychonomic Bulletin & Review, 14,* 512–516.

Santiago, J., Román, A., Ouellet, M., Rodríguez, N. & Pérez-Azor, P. (2010). In hindsight, life flows from left to right. *Psychological Research, 74,* 59–70. doi:10.1007/s00426-008-0220-0

Sawamura, H., Shima, K. & Tanji, J. (2002). Numerical representation for action in the parietal cortex of the monkey. *Nature, 415,* 918–922. doi:10.1038/415918a

Schneider, B., Parker, S., Ostrosky, D., Stein, D. & Kanow, G. (1974). A scale for the psychological magnitude of number. *Perception & Psychophysics, 16,* 43–46.

Schneider, D. W. & Logan, G. D. (2007). Defining task-set reconfiguration: The case of reference point switching. *Psychonomic Bulletin & Review, 14,* 118–125.

Schwarz, W. & Heinze, H.-J. (1998). On the interaction of numerical and size information in digit comparison: A behavioral and event-related potential study. *Neuropsychologia, 36,* 1167–1179. doi:10.1016/S0028-3932(98)00001-3

Schwarz, W. & Ischebeck, A. (2000). Sequential effects in number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 26,* 1606–1621. doi:10.1037//0096-1523.26.5.1606

Schwarz, W. & Ischebeck, A. (2003). On the relative speed account of number-size interference in comparative judgments of numerals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29,* 507–522. doi:10.1037/0096-1523.29.3.507

Schwarz, W. & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics, 66,* 651–664.

Schwarz, W. & Müller, D. (2006). Spatial associations in number-related tasks: A comparison of manual and pedal responses. *Experimental Psychology, 53,* 4–15. doi:10.1027/1618-3169.53.1.4

Schwarz, W. & Stein, F. (1998). On the temporal dynamics of digit comparison processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 24,* 1275–1293. doi:10.1037/0278-7393.24.5.1275

Shaki, S., Fischer, M. H. & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review, 16,* 328–331. doi:10.3758/PBR.16.2.328

Shaki, S. & Petrusic, W. M. (2005). On the mental number representation of negative numbers: Context-dependent SNARC effects with comparative judgments. *Psychonomic Bulletin & Review, 12,* 931–937.

Shoben, E. J., Cech, C. G., Schwanenflugel, P. J. & Sailor, K. M. (1989). Serial position effects in comparative judgements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 15,* 273–286. doi:10.1037/0096-1523.15.2.273

Siegler, R. S. & Opfer, J. E. (2003). The development of numerical estimation: Evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science, 14,* 237–243. doi:10.1111/1467-9280.02438

Steiner, G. (1988). Analoge Repräsentationen. In H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie* (S. 99–119). Weinheim: Psychologie Verlags Union.

Sternberg, S. (1969). Memory-scanning: Mental processes revealed by reaction-time experiments. *American Scientist, 57,* 421–457.

Tlauka, M. & McKenna, F. P. (1998). Mental imagery yields stimulus-response compatibility. *Acta Psychologica, 98,* 67–79. doi:10.1016/S0001-6918(97)00050-4

Torralbo, A., Santiago, J. & Lupiáñez, J. (2006). Flexible conceptual projection of time onto spatial frames of reference. *Cognitive Science, 30,* 745–757. doi:10.1207/s15516709cog0000_67

Turconi, E., Campbell, J. I. D. & Seron, X. (2006). Numerical order and quantity processing in number comparison. *Cognition, 98,* 273–285. doi:10.1016/j.cognition.2004.12.002

Tversky, B., Kugelmass, S. & Winter, A. (1991). Cross-cultural and developmental trends in graphic productions. *Cognitive Psychology, 23,* 515–557. doi:10.1016/0010-0285(91)90005-9

Tzelgov, J., Ganor-Stern, D. & Maymon-Schreiber, K. (2009). The representation of negative numbers: Exploring the effects of mode of processing and notation. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 62,* 605–624. doi:10.1080/17470210802034751

Tzelgov, J., Meyer, J. & Henik, A. (1992). Automatic and intentional processing of numerical information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 18,* 166–179. doi:10.1037/0278-7393.18.1.166

Van den Bussche, E., Van den Noortgate, W. & Reynvoet, B. (2009). Mechanisms of masked priming: A meta-analysis. *Psychological Bulletin, 135,* 452–477. doi:10.1037/a0015329

Verguts, T., Fias, W. & Stevens, M. (2005). A model of exact small-number representation. *Psychonomic Bulletin & Review, 12,* 66–80.

Welford, A. T. (1960). The measurement of sensory-motor performance: Survey and reappraisal of twelve years progress. *Ergonomics, 3,* 189–230.

Whalen, J., Gallistel, C. R. & Gelman, R. (1999). Nonverbal counting in humans: The psychophysics of number representation. *Psychological Science, 10,* 130–137. doi:10.1111/1467-9280.00120

Wilcox, R. R. (1996). *Statistics for the social sciences*. San Diego, CA: Academic Press.

Wilcox, R. R. (1997). *Introduction to robust estimation and hypotheis testing.* San Diego, CA: Academic Press.

Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C. & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: A meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly, 50,* 489–525.