

Aus der Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie
(Prof. Dr. A. Rothenberger)
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Die Entwicklung antwortbezogener Hirnaktivität:
Fehlerverarbeitung und Priming**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Silvia Muñoz Expósito
aus
Kassel
Göttingen 2015

Dekan:	Prof. Dr. Heyo K. Kroemer
I. Berichtstatter:	Prof. Dr. Aribert Rothenberger
II. Berichtstatter:	Prof. Dr. Andrea Antal
III. Berichtstatter:	Prof. Dr. Rainer Mausberg
Tag der mündlichen Prüfung:	16.11.2015

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Priming.....	4
1.1.1 Positives Priming	4
1.1.2 Negatives Priming.....	5
1.1.3 Priming bei verschiedenen Altersgruppen	10
1.1.4 Theorien zum negativen Priming	11
1.2 Gehirn	19
1.2.1 Postnatale Entwicklung des Gehirns	19
1.3 Fehlerverarbeitung und Hirnregionen.....	24
1.3.1 ACC	24
1.3.2 Mesencephalisch-dopaminerges System.....	25
1.4 Elektrophysiologie	27
1.4.1 EEG.....	27
1.5 ERP (Ereignis-korrelierte Potenziale).....	30
1.5.1 Error-negativity (Ne).....	31
1.5.2 Error-positivity (Pe)	34
1.6 Entwicklung der Fragestellung und Hypothesen.....	36
1.6.1 Verhaltensdaten: Fehleranzahl und Reaktionszeit	37
1.6.2 EEG-Daten: Ereignis-korrelierte Potenzialen Ne und Pe.....	38
1.6.3 Hypothesen zum Priming	38
2 Material und Methode	39
2.1 Studiendesign	39
2.1.1 Stichprobe	39
2.1.2 Ein- und Ausschluss-Kriterien.....	39
2.1.3 Voraussetzungen zur statistischen Auswertung	40

2.1.4	Eriksen Flanker-Aufgabe.....	41
2.2	Prozedur.....	42
2.2.1	Feedback.....	45
2.2.2	EEG.....	46
2.2.3	Statistische Auswertung der Daten.....	48
3	Ergebnisse.....	50
3.1	Statistische Beschreibung der Gruppen	50
3.2	Verhaltensdaten	52
3.2.1	Fehlerrate	52
3.2.2	Reaktionszeit	53
3.2.3	Reaktionszeit –Variabilität (RT-V).....	58
3.3	EEG-Daten: ERPs	58
3.3.1	Entwicklungseffekte und Topografie.....	59
3.3.2	Error-negativity (Ne).....	61
3.3.3	Error-positivity (Pe)	62
4	Diskussion.....	67
4.1	Probandenauswahl	67
4.2	Hypothesen.....	68
4.3	Fazit der Diskussion	87
4.4	Limitationen.....	90
5	Zusammenfassung	92
6	Literaturverzeichnis.....	96
7	Anhang	110

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Zeitliche Abfolge der Gehirnentwicklung	20
Abb. 2: Darstellung der Veränderung der kortikalen Dicke der grauen Substanz im Zeitverlauf.	21
Abb. 3: Die Positionierung und Benennung der EEG-Elektroden nach dem 10-20 System.	29
Abb. 4: Beispielhafter Verlauf eines ERPs.	31
Abb. 5: Durchschnittliche Anzahl der Sweeps in den Probandengruppen.	41
Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des Eriksen Flanker Task	43
Abb. 7: Darstellung aller im Flanker Task vorkommenden Bedingungen unter Berücksichtigung der Kongruenz, einer RR oder RC und der Leistung des Probanden im Sinne einer Richtig- oder Falschantwort.	44
Abb. 8: Darstellung der Bedingungskombinationen im Eriksen Flanker Task bezogen auf die Kongruenz zweier aufeinanderfolgender Trials.	45
Abb. 9: Geschlechterverteilung der Gruppen in der Stichprobe.	50
Abb. 10: Flussdiagramm zur Illustration der Probandenrekrutierung.	51
Abb. 11: Fehlerrate der Probanden bei kongruenten und inkongruenten Trials.	53
Abb. 12: Durchschnittliche Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen mit Unterscheidung der verschiedenen Bedingungen.	54
Abb. 13: Durchschnittliche Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen bei kongruenten und inkongruenten Trials.	54
Abb. 14: Durchschnittliche Reaktionszeiten in ms beider Gruppen unter den Bedingungen prev. resp. kgr. oder ikgr.	55
Abb. 15: Durchschnittliche Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen unter den Bedingungen RR und RC.	56
Abb. 16: Durchschnittliche Reaktionszeiten in ms beider Gruppen unter den Priming- Bedingungen prev. resp. RC oder RC.	57
Abb. 17: Durchschnittlichen Reaktionszeit-Variabilität (RT-V) bei kongruenten und inkongruenten Trials.	58
Abb. 18: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Ne- und Pe-Maximal- Amplituden an den verschiedenen Elektroden im Gruppenvergleich.	60

Abb. 19: Durchschnittlichen Ne-Enhancement-Werte von Kindern und Erwachsenen (in μV) im Gruppenvergleich.....	61
Abb. 20: Durchschnittliche Ne-Enhancement-Werte beider Gruppen unter dem Einfluss des Primings mit Angabe des Standardfehlers.....	62
Abb. 21: Durchschnittliche Pe-Enhancement-Werte beider Gruppen unter dem Einfluss des Primings.....	63
Abb. 22: Durchschnittlichen Pe-Enhancement-Werte von Kindern und Erwachsenen (in μV) im Gruppenvergleich.....	63
Abb. 23: Zeitlicher Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe für die Bedingungen RC/RR-SII.	64
Abb. 24: Zeitlicher Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe für die Bedingungen RC/RR-SIC.	65
Abb. 25: Zeitlicher Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe für die Bedingungen RC/RR-SCC.....	66

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anzahl der Sweeps während der Trials.	110
Tab. 2: Auflistung der durchnittlichen Reaktionszeiten (in ms) bezogen auf die unterschiedlichen Bedingungen.....	110
Tab. 3: Auflistung der Error-negativity (Ne) Grundwerte.	111
Tab. 4: Auflistung der Error-positivity (Pe) Grundwerte.....	111

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AAC	anteriorer cingulärer Kortex
EEG	Elektroenzephalogramm
EOG	Elektrooculogramm
ERP	Ereignis-korreliertes Potenzial (<i>event-related-potential</i>)
fMRI	funktionelles Magnetresonanztomogramm
Ne	<i>error-related negativity</i> (fehlerbezogene Negativität)
Pe	<i>error-related positivity</i> (fehlerbezogene Positivität)
nP	negatives Priming
pP	positives Priming
RT	Reaktionszeit
RR	Antwortwiederholung (<i>response repetition</i>): Die Antwort auf den Zielpfeil des ersten Trials entspricht der Antwort auf den Zielpfeil des direkt folgenden Trials
RC	Antwortwechsel (<i>response change</i>): Antwortwechsel auf die Zielpfeile zwischen aufeinanderfolgenden Trials
SCC	Stimulus kongruent korrekt (<i>stimulus congruent correct</i>)
SIC	Stimulus inkongruent korrekt (<i>stimulus incongruent correct</i>)
SII	Stimulus inkongruent inkorrekt (<i>stimulus incongruent incorrect</i>)
SCI	Stimulus kongruent inkorrekt (<i>stimulus congruent incorrect</i>)
prev. resp.	vorangegangene Antwort (<i>previous response</i>)
RT-V	Reaktionszeit- Variabilität
kgr.	Kongruent
ikgr.	Inkongruent
mdS	mesencephalisches-dopaminerges System
PFC	präfrontaler Kortex (<i>prefrontal cortex</i>)
Prime	beschreibt einen ersten Trial, auf den ein weiterer (Probe-Trial) folgt

Probe	beschreibt einen zweiten Trial, der auf einen ersten (Prime-Trial) folgt
CI	kongruent-inkongruent: Einer kongruenten Pfeil-Kombination eines ersten Trials (Prime) folgt eine inkongruente Pfeil-Kombination im nächsten Trial (Probe)
II	inkongruent-inkongruent: Einer inkongruenten Pfeil-Kombination eines ersten Trials (Prime) folgt eine inkongruente Pfeil-Kombination im nächsten Trial (Probe)
IC	inkongruent-kongruent: Einer inkongruenten Pfeil-Kombination eines ersten Trials (Prime) folgt eine kongruente Pfeil-Kombination im nächsten Trial (Probe)
CC	kongruent-kongruent: Einer kongruenten Pfeil-Kombination eines ersten Trials (Prime) folgt eine kongruente Pfeil-Kombination im nächsten Trial (Probe)
SD	Standardabweichung
ANOVA	Varianzanalyse (<i>analysis of variance</i>)

1 Einleitung

„Errare humanum est, sed in errare perseverare diabolicum“ – zu Deutsch übersetzt: "Irren ist menschlich, aber auf Irrtümern zu bestehen ist teuflisch" (nach Seneca Epistulae morales VI, 57, 12) (Ernst L. 2002). Es liegt also in der Natur des Menschen, Fehler zu begehen. Doch wie kommt es zu einem Fehler und was sind seine Konsequenzen für unseren Alltag? Macht ein Erwachsener immernoch dieselben Fehler wie ein Kind oder hilft die Entwicklung eines jeden Individuums seine persönliche Fehlerquote zu verbessern? Betrachtet man zunächst die reine Definition des Begriffes „Fehler“, so erhält man folgende Beschreibung: „[1] Abweichung von einem optimalen Zustand, Verfahren oder dem Richtigen, [2] eine schadhafte Stelle, eine Stelle mit einem Mangel, [3] eine falsche Entscheidung, eine falsche Handlung, [4] eine körperliche oder charakterliche Schwäche“ (Wikipedia s.v. *Fehler*). Der Mensch hat im Laufe der Evolution Eigenschaften entwickelt, sich Fehler zu Nutze machen zu können und ein Fehlverhalten in einen Lernprozess zu integrieren, um Folgefehler zu vermeiden und somit eine „Schwäche“ in eine Stärke umzuwandeln. Darüber hinaus „lernt man nie aus“, also auch ein Erwachsener befindet sich in einem immer fortwährenden Prozesses des Dazulernens. Doch hat ein Erwachsener gegenüber einem Kind tatsächlich nur Vorteile, oder ist er gerade aufgrund seiner Lebenserfahrung sogar manchmal benachteiligt? Hinter vielen Prozessen verbirgt sich ein umfangreicher Komplex aus bewussten Faktoren wie Aufmerksamkeit, Konzentration, Gedächtnis, Fehlerverarbeitung und die eigene Analyse des Fehlverhaltens. Doch gerade die unbewussten Mechanismen scheinen es zu sein, welche die eigentliche Kontrolle über unser Verhalten haben. Versetzen wir uns als Beispiel in ein Großraumbüro einer Telefongesellschaft, in dem ein ohrenbetäubender Lautstärkepegel aus klingelnden Telefonen und Gesprächen der Kollegen herrscht. Dazu kommen zahlreiche visuelle Reizquellen natürlicher und digitaler Form. Alles in Allem prasselt eine Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse auf einen Mitarbeiter einer solchen Firma ein, der es dennoch schafft, seinen Arbeitsalltag effizient zu gestalten. Doch wie schafft er es, all die für ihn irrelevanten Reize zu umgehen und seine Aufmerksamkeit tatsächlich nur auf die Dinge zu richten, die für die Ausübung seiner Arbeit

von Bedeutung sind?

Der Mensch muss über Fähigkeiten verfügen, irrelevante Störfaktoren zu ignorieren und sich auf eine Sache konzentrieren zu können. Ebendiese Eigenschaft bezeichnet man als selektive Aufmerksamkeit. Etwas im Kopf navigiert uns durch das Chaos des modernen Alltags. Doch was genau steckt letztendlich dahinter? Die Entscheidung, den Anruf zu beantworten, hat der Angestellte wohl nicht aktiv getroffen. Vielmehr war es eine routinierte Handlung, für die bereits eine Betriebsanleitung in seinem Kopf vorlag. Doch auch diese Intuition kam nicht aus dem Nichts. Sein automatisches Handeln basiert auf seiner Erfahrung und auf endlosen Wiederholungen immer wieder durchgeführter komplexer Abläufe während seiner Entwicklung. Im Gehirn hinterlegte Daten helfen uns, uns schnell im Vertrauten zurechtzufinden und Routinen für einfache, aber dennoch komplexe Prozesse zu entwickeln. Je öfter man diese Abläufe durchlebt, desto eindeutiger neuronale Verknüpfungen für eine bestimmte Funktion entstehen und desto weniger Energie kostet es, schnell und zielgerichtet zu handeln. Es wäre wohl kaum vorstellbar, wie anstrengend und herausfordernd ein Alltag wäre, wenn man über jeden einzelnen Schritt unseres Handelns aktiv nachdenken müsste. Die automatisch abrufbaren Datensätze helfen uns, die immense Menge an einströmenden Informationen zu bewältigen und nur die Informationen aktiv zu bearbeiten, welche für unsere aktuellen Handlungen neu und relevant sind. Doch wonach entscheidet dieses System, welche Informationen tatsächlich wichtig für uns sind und welche nicht? Was passiert mit Informationen, die für die aktuelle Handlung als irrelevant eingestuft wurden? Es konnte festgestellt werden, dass diese Daten nicht einfach aus dem Gedächtnis gelöscht werden, sondern dass auch sie einem aktiven Vorgang unterliegen (Tipper 1985). Unter diesem Datenstrom vollbringt das menschliche Hirn auf allen Ebenen wahre Höchstleistungen. Unser Hirn ist darauf programmiert, Zusammenhänge herzustellen. Beeinflussen solche Bahnungen bewusst oder unbewusst unser Handeln, so nennt man dies Priming (engl.). Die Aktivierung gespeicherter Verknüpfungen im Hirn anhand von Vorerfahrungen mit den betreffenden Daten scheinen sich nicht so einfach abschalten und neuerschalten zu lassen und verlaufen zumeist unbewusst (Wikipedia s.v. *Priming (Psychologie)*). Sie können unsere Handlungen aber auf zwei

verschiedene Weisen beeinflussen: Zum einen kann die Verarbeitung eines Reizes erleichtert, beschleunigt und mit weniger Fehlern durchgeführt werden, wenn implizite Gedächtnisinhalte durch einen vorangegangenen Reiz aktiviert wurden. Dieses Phänomen wird als positives Priming (pP) bezeichnet. Zum anderen können sie eine Handlung behindern und zu einer fehlerhaften Reaktion führen. In dem Fall spricht man vom negativen Priming (nP). Die beiden Effekte konnten in zahlreichen Zusammenhängen beobachtet und reproduziert werden, siehe z.B. Fox (1995), May et al. (1995) oder Neill et al. (1995).

Eine zentrale Frage, zu der es bislang wenige Forschungsarbeiten gibt, beschäftigt sich mit der Ausprägung des Primings bei Kindern und Erwachsenen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass das nP trotz der jahrelangen gegensätzlichen Annahme kein altersabhängiger Effekt ist (Verhaeghen und Meersman 1998; Gamboz et al. 2002). Viele Studien konzentrierten sich jedoch eher auf die An- oder Abwesenheit des Effekts generell als auf die Art seiner Ausprägung bei Kindern und Erwachsenen (May et al. 1995; McDowd et al. 1995). Diese Forschungslücke will die vorliegende Arbeit schließen.

1.1 Priming

Wie bereits erwähnt, können Erfahrungen mit einem bestimmten Erleben dazu führen, dass sich neuronale Verknüpfungen im Hirn bilden. Diese Bahnungen geschehen meist unbewusst und beeinflussen das Verhalten oder eine folgende Reaktion auf den Reiz auf unterschiedliche Weise. Sie können dazu führen, dass der Mensch, kommt er ein zweites Mal mit den gleichen oder ähnlichen Erlebensweisen in Berührung, seine Vorerfahrung nutzen kann, um die Muster schneller wiederzuerkennen und verarbeiten zu können. Der wiedererkannte Reiz löst dabei eine Aktivierung impliziter Gedächtnisinhalte aus, welche durch den vorhergehenden gleichen Reiz gebildet wurden (Wikipedia s.v. *Priming (Psychologie)*). Doch führen diese Vorerfahrungen nicht unbedingt zu einer Erleichterung oder Beschleunigung der Verarbeitung. Wird ein Reiz fehlinterpretiert oder mit einem ähnlichen Reiz verwechselt, kann dies eine fehlerhafte Reaktion hervorrufen. Die auf einen Organismus einwirkenden Reize stammen dabei aus jeglichen Eindrücken der visuellen, auditorischen, gustatorischen oder sensorischen Sinneswahrnehmung. In der experimentellen Physiologie werden Zielreize (engl. Target) verwendet, auf welche Probanden gezielt reagieren sollen, während wiederum begleitende Störreize (Distraktoren) bewusst ignoriert werden sollen. Aufgrund der oft ähnlichen Beschaffenheit von Zielreizen und ihren begleitenden Distraktoren werden jedoch zumeist auch die Distraktoren unbewusst aufgenommen und nehmen Einfluss auf die Reaktion auf das Target. Dieser Distraktoreinfluss kann sich entweder positiv oder negativ auf das Reaktionsverhalten auswirken.

1.1.1 Positives Priming

Die Wiederholung eines bereits zuvor verarbeiteten Ziel-Stimulus kann die Beantwortung des Folgenden erleichtern, beschleunigen und für eine hohe Fehlerfreiheit sorgen (Tipper 1985; Allport et al. 1994; Wallesch et al. 2004; Allport und Wylie 2000). Der Mensch greift dabei auf bereits wahrgenommene und verarbeitete Informationen zurück und nutzt diese Daten für einen sichereren Umgang mit folgenden Herausforderungen. Am besten kann dieser Bahnungs-Effekt

anhand einfacher Priming-Paradigmen nachvollzogen werden. Sind in einer einfachen Reaktions-Aufgabe die Antworten auf zwei aufeinanderfolgend präsentierte Stimuli identisch, so können bei sich wiederholenden Reizen die für ihre Beantwortung benötigten Informationen als bekannt verstanden werden. Es fällt leichter, den Stimulus richtig einzuordnen und darauf zu reagieren. Es kann zum einen sein, dass sich ein Proband die Anordnung des Targets merkt oder aber das Target "gelesen" und verarbeitet wird (Logan und Schneider 2006). Die Aufgabe kann schneller gelöst werden und man macht weniger Fehler. Dieser beschriebene Effekt wird positives Priming genannt. Es wird deutlich, dass der Konkordanz-Effekt, also das wiederholte Vorkommen zweier übereinstimmender Stimuli, und das pP eng miteinander verknüpft sind. Je mehr Erfahrung ein Proband bei der Beantwortung der Tasks sammelt, desto mehr brauchbare Informationen speichert er ab, um sie für folgende Beantwortungen benutzen zu können. Dieser Effekt kann mit der Zeit in Millisekunden beschrieben werden, die ein Proband bei einer Aufgabe einspart, bei der ein sich wiederholender Stimulus präsentiert wird im Gegensatz zu einer Aufgabe, in der die Testperson auf einen noch unbekanntem Reiz antworten muss. Die Zeitersparnis ist ein positiver Wert, weshalb der Effekt pP genannt wird. Wiederholt sich ein Target und seine korrespondierende Reaktion (RR/Konkordanz) in zwei aufeinanderfolgenden Trials, während es von Distraktoren begleitet wird, spiegelt eine verkürzte Reaktionszeit und eine niedrige Fehlerquote den positiven *response-repetition* Priming-Effekt wider (May et al. 1995; Rothermund et al. 2005).

1.1.2 Negatives Priming

Die zweite Variante des Primings ist das negative Priming (nP). Es führt dazu, dass die Beantwortung eines Folge-Trials aufgrund der zuvor gesammelten Information erschwert und verzögert wird. Bereits 1966 konnte die zeitliche Antwortverzögerung anhand des Stroop-Tests beobachtet werden (Dalrymple-Alford und Budayer 1966). Dabei mussten Probanden die Schriftfarbe eines Wort-Stimulus, der in Form eines ausgeschriebenen Farbnamen präsentiert wurde, benennen. Kam es zu einer Differenz zwischen dem „Farbwort“ und seiner Druckfarbe, so kam es zu einem Anstieg der Reaktionszeiten, und auch eine erhöhte Fehlerquote ließ sich feststellen.

Auch heute lässt sich das Phänomen in experimentellen Studien am besten anhand von Selektionsaufgaben betrachten. In einem typischen nP-Paradigma (Fox 1995; May et al. 1995; Tipper 2001) bekommt ein Proband zwei kurz aufeinanderfolgende Aufgaben dargeboten. Der erste Durchgang wird dabei Prime-Trial genannt (kurz: Prime), während der zweite der Probe-Trial (kurz: Probe) ist. Der Proband muss zunächst im Prime auf einen Zielreiz reagieren, während ablenkende, parallel präsentierte Objekte zu ignorieren sind. Der Hemmungs-Effekt zeigt sich im jeweils folgenden Probe, in dem der zuvor ignorierte Reiz nun zum Zielobjekt wird (Distraktor-zu-Target-Bedingung), was mit einer verzögerten Verarbeitung einhergeht (Tipper 1985; Milliken et al. 1998; Rothermund et al. 2005; Gibbons und Frings 2010). Tipper benutzte beispielsweise verschiedenfarbige, sich überlagernde einfache Objekte, welche auf einem weißen Hintergrund präsentiert wurden (Tipper 1985). Dabei galt es, auf rot gefärbte Objekte zu reagieren, während grün kolorierte Reize, welche über die rot gezeichneten Objekte gelegt wurden, ignoriert werden sollten. Sollte im Probe auf einen roten Stimulus reagiert werden, welcher zuvor im Prime noch als grün kolorierter Distraktor ignoriert werden sollte, so kam es zu einer verzögerten Antwort auf diesen Reiz. Es handelt sich bei dem nP also um einen Sequenzeffekt, der anhand der im Probe benötigten Reaktionszeit gemessen wird. Der Effekt kann letztendlich mit der Zeit in Millisekunden beschrieben werden, die ein Proband im Durchschnitt länger benötigt, um auf einen Stimulus zu reagieren, der zuvor im Prime noch als Distraktor ignoriert wurde, als für die Beantwortung eines Reizes, der nicht wiederholt wurde. Diese Zeiteinheit ist meist im negativen Bereich, weshalb es zu der Benennung „negatives Priming“ kam.

Eine wichtige Unterart des Primings ist das sog. *response priming*. Es beschreibt in der Wahrnehmungspsychologie die Bahnung einer Reaktion in einem Test, bei dem zwei Stimuli schnell aufeinanderfolgen, wobei beide Reize mit unterschiedlichen motorischen Antwortalternativen assoziiert sind. Der Antwortkonflikt, welcher entsteht sobald es zu einer Differenz zwischen zuvor abgegebener und aktuell verlangter Antwort kommt, ist verantwortlich für den nP-Effekt. Das nP konnte in verschiedenen experimentellen Kontexten sicher dargestellt werden (Fox 1995; May et al. 1995; Neill et al. 1995) und man fand heraus, dass er von mehreren

Rahmenbedingungen des Tests beeinflusst wird. Meist kann der Effekt beobachtet werden, wenn zwischen Prime und Probe ein Antwortwechsel (kurz: RC (*response change*)) gefordert wird. Das Wiederholen eines zu beantwortenden Reizes in beiden Durchgängen (kurz: RR (*response repetition*)) führt meist aufgrund eines Konkordanz-Effektes zu einer Reaktionszeitbeschleunigung und geht mit einem pP-Effekt einher (Rothermund et al. 2005).

Ein weiterer Faktor, der Einfluss auf das Priming besitzt, ist die Kongruenz oder Inkongruenz zweier aufeinanderfolgender Targets im Bezug zu ihren Distraktoren. Zeigen Flanker und Target in dieselbe Richtung, so spricht man von Kongruenz, weisen sie in entgegengesetzte Richtungen, so liegt eine Flanker-Target-Inkongruenz vor. Es liegt nahe, dass man bei der Bearbeitung ikgr. Trials auf einen größeren Konflikt stoßen muss, da gleich zwei unterschiedliche Stimuli, auf die mit unterschiedlichen Antworten reagiert werden muss, aufgenommen werden müssen. Es gilt als bekannt, dass die Beschaffenheit des vorangehenden Trials einen signifikanten Einfluss auf die Leistung bei der Bearbeitung des direkt folgenden Trials hat (Ullsperger et al. 2005; Weissman und Carp 2013). Gratton et al. testeten diesen Zusammenhang anhand einer Buchstaben-Selektionsaufgabe, bei der Probanden auf kongruente (SSSSS oder HHHHH) oder inkongruente Buchstabenabfolge (SSHSS oder HSHHH) reagieren mussten (Gratton et al. 1992). Der sogenannte Gratton-Effekt beschreibt eine bessere und schnellere Leistung bei kongruenten (kgr.) als bei inkongruenten (ikgr.) Trials. Bei kgr. Trials, denen ein ebenfalls kgr. Prime-Trial vorrausging (kgr. Prime gefolgt von einem kgr. Probe, CC-Bedingung), erzielten die Probanden ebenfalls bessere Ergebnisse als wenn ein kgr. Trial auf einen ikgr. Trial folgte oder umgekehrt (ikgr. Prime gefolgt von einem kgr. Probe, IC-Bedingung oder kgr. Prime gefolgt von einem ikgr. Probe, CI-Bedingung). Das Gleiche konnte für zwei aufeinanderfolgende ikgr. Trials beobachtet werden (II-Bedingung). Des Weiteren beschreibt der Kongruenz-Sequenz-Effekt (Gratton-Effekt) bei Distraktor-Interferenz-Aufgaben schnellere Reaktionszeiten und kleinere Kongruenzeffekte (also einen geringeren Konflikt) nach ikgr. Der von Gratton beschriebene Effekt konnte bereits bei zahlreichen Kongruenz-Tests wie z.B. im Stroop-Test (Dalrymple-Alford und Budayer 1966; Kerns et al. 2004; Egner et al. 2010) oder im Eriksen

Flanker Task (Eriksen und Eriksen 1974; Eriksen und Schultz 1979; Ullsperger et al. 2005) gezeigt werden. Über die Ursache des Kongruenz-Effekts wird bis heute diskutiert. Gratton und ihr Team nahmen an, dass die Erwartungshaltung der Probanden hierfür verantwortlich ist. Demnach führe die Erwartung, nach einem kgr. Trial erneut auf einen kgr. und zum vorhergehenden Trial kompatiblen Trial reagieren zu müssen, zu einer erleichterten schnelleren Antwort. In dem Fall führt eine gelockerte Aufmerksamkeitsverteilung dazu, dass der Focus nicht nur auf das eigentliche Target gelegt wird, sondern auch die Distraktoren beachtet werden. Da diese hier zum Target kongruent sind, üben sie eine unterstützende Funktion auf die geforderte Beantwortung aus. Folgt jedoch wider Erwarten ein ikgr. Trial, so ist die Reaktion erschwert und verzögert. Erwartet der Proband hingegen einen ikgr. Trial, legt er all seine Aufmerksamkeit auf das eigentliche Target, während die Distraktoren stärker ignoriert werden, was eine schnellere und sichere Antwort auf das Target zur Folge hat. Auch hier würde das wieder erwartete Auftreten eines kgr. Trials die Reaktion erschweren.

Botvinick et al. (2004) sehen die Ursache des Kongruenz-Effekts hingegen im Konflikt-Adaptions-Effekt. Wie Botvinick in seinem *conflict-control-model* beschreibt, ruft der ACC in Konfliktsituationen, also auch bei einer Flanker-Target-Inkongruenz, ein Signal hervor, welches die kognitiven Kontrollfunktionen des präfrontalen Kortex fördert (Botvinick et al. 2001; Botvinick et al. 2004). Die verstärkte Aufmerksamkeit auf bewusst schwieriger zu bearbeitende Aufgaben (also ikgr. Trials) führt zu einer Förderung der kognitiven Fähigkeiten und zu einer Verminderung der Reaktionszeit und der Fehlerquote. Die entspanntere Bearbeitung von *non-conflict*-Trials (also kgr. Trials) hingegen führt eine geringere Kontrollausübung mit sich, was den Distraktoren einen erleichterten Zugang zum Verarbeitungsprozess ermöglicht. Beide genannten Theorien implizieren, dass auch die irrelevanten Flanker in die Verarbeitung eines Trials aufgenommen werden müssen, wie auch schon Mattler (2003) postulierte. Kerns et al. (2004) konnten diese Vermutung unterstützen und fanden während eines Stroop-Tests nicht nur schnellere Reaktionszeiten bei ikgr. Probe-Trials, die auf einen ebenfalls ikgr. Prime folgten (II), als bei ikgr. Probes, die auf einen kgr. Prime folgten (CI), sondern zeigten auch, dass die II-Bedingung mit

einer deutlich verringerten Aktivität des ACC assoziiert ist.

Mayr et al. (2003) konnten zeigen, dass auch eine geforderte Antwortwiederholung oder ein Antwortwechsel Einfluss auf den Effekt haben. In ihrem Flanker-Experiment kam es nur dann zu einer Konfliktadaption, wenn sowohl Flanker als auch Target im Prime und Probe übereinstimmen, also die Prime-Antwort und Reaktion kompatibel zur Probe-Reaktion war. Andere Studien unterstützten dieses Ergebnis (Nieuwenhuis et al. 2006) und vermuteten dahinter einen pP-Effekt, welcher bei der Stimuli-Wiederholung auftritt. Hinzu kommt möglicherweise ein dritter einflussreicher Faktor. In vielen Studien erscheinen in vielen Variationen des Eriksen Flanker Tasks die Flanker zeitlich vor dem eigentlichen Target. Inwiefern der zeitliche Präsentationsablauf einen Einfluss auf das Selektions- und Aufnahmeverhalten hat, versuchten Eriksen und Schulz in ihrem *continuous flow model* zu verdeutlichen (Eriksen und Schultz 1979). Das Modell besagt, dass der Informationsverarbeitungsprozess beginnt, sobald die ersten visuellen oder akustischen Stimuli auf einen Organismus einwirken. Durch das frühere Erscheinen der Flanker wird die Antwort stärker durch die mit ihnen assoziierten Informationen beeinflusst. Ihre Verarbeitung beginnt wesentlich früher als die des eigentlich als relevant zu betrachtenden Targets. In einem ikgr. Trial bedeutet dies, dass die Informationsverarbeitung im Eriksen Flanker Task bei den zuerst eingeblendeten kgr. Flankern startet und im weiteren Verlauf von der Wahrnehmung des zu ihnen ikgr. Zielpfeils ergänzt wird. Nach und nach wird die Aufmerksamkeit des Probanden auf den Zielpfeil gerichtet und die Bedeutung der Flanker rückt in den Hintergrund. Da jedoch für die Flanker bereits der Antwortprozess begonnen hat, kommt es im Falle einer Flanker-Target-Inkongruenz zu einem Konflikt (Coles et al. 1985). Es fällt bei ikgr. Trials schwerer, die zuvor durch die Flanker begonnene Antwort, die nun aber für das eigentliche aktuelle Target inkorrekt wäre, zu umgehen und eine korrekte Reaktion auf das Zielobjekt zu entwickeln. Eine Verlängerung der Reaktionszeit ist die Folge. Es wird deutlich, dass auch diejenigen Reize, welche es zu ignorieren galt, aber doch unbewusst aufgenommen wurden, einen immensen Einfluss auf das Reaktionsverhalten haben. Stimmt bei einer RR-Bedingung die Reaktion auf das Probe-Target mit der auf das Prime-Target überein und wird das Target zudem in

beiden Trials von den gleichen Distraktoren begleitet, so kommt es zu schnelleren Reaktionszeiten als wenn die Prime- und Probe-Distraktoren wechseln (Frings et al. 2007b). Kommt es hingegen zu einer Distraktor-Wiederholung, während das Target wechselt, so konnte eine zeitliche Einbuße verzeichnet werden. Die Forscher vermuteten, dass der Probe-Distraktor in dem Fall mit der hier inkompatiblen Prime-Reaktion assoziiert wird. Die Bemerkung und Überwindung der Differenz stehe für die entstandenen Zeitkosten. Allerdings konnten Frings und sein Team in einem anderen Experiment auch unter einer RC-Situation einen Zeitvorteil gegenüber einer RR-Bedingung feststellen, wenn die Prime-Distraktoren im Probe wiederholt wurden (Frings und Wühr 2007). Die Wissenschaftler vermuteten, dass in dieser Distraktor-Repetition-Kondition die Selektion eines Targets gegen Prime-Distraktoren hilft, das nächste Target im folgenden Probe zu identifizieren, wenn dieses wieder von den gleichen Distraktoren begleitet wird. Das unterschiedliche Vorkommen des Effekts könnte auch durch eine Strategiebildung der Probanden während des Testverlaufs begründet sein. Ob Kinder und Erwachsene dieselben Strategien entwickeln, bleibt bislang unklar.

1.1.3 Priming bei verschiedenen Altersgruppen

Differenzen zwischen verschiedenen Studiendesigns führten dazu, dass bei einigen Studien gar kein nP-Effekt beobachtet werden konnte, wohingegen wiederum andere Gruppen einen deutlich ausgeprägten Effekt aufwiesen. Seit einer Studie von Tipper et al. (1989) ging man davon aus, dass bei Kindern im Grundschulalter (ca. 6-10 Jahre) aufgrund ihres Entwicklungsstandes noch kein nP vorzufinden ist. Dieses Studienergebnis galt lange als Basis für Erklärungen zahlreicher Ergebnisse weiterer Studien. Man ging davon aus, dass komplexe inhibitorische Kontrollprozesse sowie die Fähigkeit zur selektiven Aufmerksamkeit erst bei jungen Erwachsenen vollständig entwickelt und nachzuweisen sind. Aktuellere Studien konnten diese Annahme erfolgreich widerlegen und bewiesen entgegen Tippers Befunden klare nP-Effekte bei Grundschulkindern (Pritchard und Neumann 2004; Frings et al. 2007a; Pritchard und Neumann 2009). Darüber hinaus konnten Frings et al. (2007a) zeigen, dass das nP bei Kindern im Altersbereich von 6 bis 11 Jahren gleichermaßen ausgeprägt ist

und die Kinder während dieser Zeitspanne keinerlei entwicklungsbedingte Effektunterschiede aufweisen. Zudem konnten sie nachweisen, dass sich das nP der Kinder nicht signifikant von dem der Erwachsenen unterschied. Diese Ergebnisse beweisen, dass selektive Kontroll- und Inhibitionsmechanismen bereits im Kindesalter angelegt sind. Um mehr Klarheit über altersbedingte Differenzen des Phänomens zu erhalten, ist es sinnvoll, die neuroanatomische Entwicklung diverser Hirnregionen zu betrachten. Dieses Thema wird in einem späteren Kapitel behandelt.

1.1.4 Theorien zum negativen Priming

Aufgrund seiner konträren Erscheinungsformen existiert bereits eine Reihe verschiedener Erklärungsansätze, welche den nP-Effekt erklären sollen. Bis heute existiert jedoch keine Theorie, mit der sich alle Formen seines Vorkommens begründen lassen. Im Folgenden werden die populärsten Theorien näher erläutert.

1.1.4.1 Inhibitionstheorie

Die Inhibitionstheorie beschreibt die direkte Inhibition von Distraktoren während der parallelen Präsentation von Target und Störfaktoren (Tipper 1985; Tipper und Cranston 1985; Allport et al. 1985). Wird ein Prime-Distraktor zum Probe-Target, so muss dessen Inhibition erst überwunden werden, und das Objekt muss erst wieder als mögliches Zielobjekt „freigegeben“ werden. Auch die Verhaltensinhibition auf diesen Reiz muss aufgehoben werden, was den Zeitaufwand erklärt. Zu beachten ist, dass es hierbei sowohl zu einer internen Aufnahme des Targets als auch des Distraktors kommen muss, damit entschieden werden kann, ob das Objekt gehemmt oder aktiviert werden soll. Ob alle visuell aufgenommenen Items dabei die gleiche Tiefe der Wahrnehmung erreichen, ist bislang ungeklärt. Man kann vermuten, dass die als Ziel betrachteten Reize eine tiefere Ebene der Wahrnehmung erreichen, da sie für die Handlungsausübung relevant sind.

Eine Weiterentwicklung der klassischen Inhibitionstheorie wurde 1994 von Houghton und Tipper im Zusammenhang mit dem Modell zur selektiven

Aufmerksamkeit beschrieben. Sie besagt, dass die Inhibition eine interne Aufnahme der Distraktoren verhindert, so dass diese gar nicht erst an der Informationsverarbeitung teilnehmen können. Während eines Matchings wird das Zielobjekt aus allen einwirkenden Reizen aktiv herausfiltert. Nur die zu diesem Objekt gehörenden Informationen werden zur weiteren Verarbeitung zugelassen und verstärkt, während die Reaktion auf alle irrelevanten Details inhibiert wird. Die beiden Aktivierungszustände, also sowohl die gehemmten Störfaktoren als auch das aktivierte Target, halten nach Beantwortung einer Aufgabe noch für eine Weile an (Gibbons und Frings 2010). Houghton und Tipper beschreiben das Überdauern der Befehl-Aktivierung als Rebound-Effekt (Houghton und Tipper 1994). Wird ein Prime-Distraktor zeitnah im folgenden Trial zum Zielobjekt, so muss dessen Hemmung erst aufgehoben werden. Ebendieses Szenario beschreibt den engen Zusammenhang der selektiven Aufmerksamkeit mit dem nP-Effekt (Frings und Groh-Bordin 2007). Anhand dieser Theorie können auch nP-Effekte bei Experimenten erklärt werden, bei denen keine Reaktion im Prime gefordert wird sondern erst im Probe auf ein Ziel reagiert werden soll. Neumann und DeSchepper (1991) ließen Probanden während einer Matching-Aufgabe ein Prime-Target mit dem Target eines Probes auf Übereinstimmung testen. Die Probanden sollten die ihnen dargebotenen Prime-Stimuli lediglich betrachten, ohne jedoch darauf zu reagieren. Die Beantwortung erfolgte erst im folgenden Probe-Trial in Form einer Ja/Nein-Antwort, also ob die beiden zu beachtenden Targets identisch waren oder nicht. Eine Inhibition einzelner Reize konnte in dem Fall nicht stattfinden, dennoch konnte der nP-Effekt hier nachgewiesen werden.

Forscher konnten zeigen, dass sich bei Trials, zwischen denen das zeitliche Intervall zwischen Prime- und Probe-Display sehr kurz gehalten wird (20-50 ms), kein nP-Effekt nachweisen lässt (Lowe 1985; Neill und Westberry 1987). Demnach vermutete man, dass sich die Inhibition erst nach der aktiven Auswahl entwickelt, um z.B. eine ungewollte Reaktivierung des Objektes vor erfolgreicher Aufgabenausführung zu vermeiden (May et al. 1995). Auch Yee (1991) konnte in einem Experiment nachweisen, dass es bei einem Intervall von 500 ms zu einem pP-Effekt im Probe kommt, während ein längeres Zeitfenster von 600 ms zwischen Prime- und Probe-

Präsentation zu einem nP-Effekt führt. Lupiáñez et al. (2000) schlussfolgerten, dass das nP ein gewisses Zeitfenster benötigt um sich generieren zu können. Wird dieser zeitliche Rahmen unterschritten, kann der Inhibitionsmechanismus nicht (vollständig) ablaufen. Die Umkehr in den positiven Effekt begründen die Wissenschaftler mit einer generellen parallelen internen Aufnahme und Aktivierung sowohl der Distraktoren als auch des Targets (Neumann und DeSchepper 1992). Erst das zur Verfügung stehende Zeitfenster entscheidet, wie weit die einzelnen Objekte weiter bearbeitet werden. Es beeinflusst, ob es zu einer Inhibition der Distraktoren kommt, während das Target weiter aktiviert wird und zur motorischen Handlungsausübung führt, oder ob es lediglich zur Verarbeitung des Zielreizes kommt, während die Störfaktoren einfach auf ihrem bis dahin abgelaufenen Aktivierungszustand verweilen.

Nichtdestotrotz ließen sich viele Ergebnisse in der Literatur der vergangenen Jahre nicht mit der Inhibitionstheorie begründen. Wurden in Versuchsvarianten beispielsweise Targets ohne Distraktoren präsentiert, konnte das Ausbleiben des nP-Effekts oder gar eine Umkehr in einen positiven Effekt beobachtet werden (Neill et al. 1995; Tipper et al. 1990; Milliken et al. 1998). Die somit als bewiesen dargestellte Abhängigkeit des Effekts von der Anwesenheit parallel gezeigter Distraktoren wurde gern als Gegenevidenz der Inhibitionstheorie diskutiert (Fox 1995).

1.1.4.2 Episodische-Wiederabruf-Theorie (*episodic retrieval theory*)

Die Forschungsgruppe um W. Trammel Neill bot einen zum Inhibitionsmodell konträren Erklärungsansatz des Phänomens (Neill 1997; Neill und Valdes 1996; Neill et al. 1995; Neill et al. 1992). Sie beziehen sich auf den Zusammenhang des Effekts mit dem Gedächtnis, in welchem sowohl die aktivierten als auch die inhibierten Reize abgespeichert werden. Wird ein Stimulus im Prime aufgenommen, so hinterlegt der Organismus alle zu diesem Reiz gehörenden Informationen. Hat sich eine Antwort bewährt, so wird das passende Lösungsprogramm gespeichert. Die gespeicherten Daten werden bei folgenden Trials automatisch wieder abgerufen. Dieser fertige Datensatz enthält sowohl die Stimulus-Informationen als auch

Informationen über die geforderten motorischen Reaktionsabläufe für die einzelnen Reize und kann ebenso Inhibitionsvorgänge der Distraktoren beinhalten (Neill 1997; Hommel 1998; Rothermund et al. 2005). Er bietet folglich ein nützliches und schnell verfügbares Lösungsprogramm für zahlreiche Abläufe. Der nP-Effekt kommt hierbei im Probe-Trial zustande, sobald Interferenzen zwischen der gespeicherten Information und der aktuell geforderten Antwort erkannt werden, und nicht wie bei der Inhibitionstheorie beschrieben, nachdem es zur Inhibition der irrelevanten Stimuli im Prime kam. Er spiegelt den Umdenkvorgang wieder, bei dem ein Objekt, zu dem beim Prime der Befehl „ignoriere“ gehörte, nun aber der Befehl „beachte und beantworte“ ausgeführt werden muss. Rothermund et al. (2005) vermuten, dass es bei der Distraktor-zu-Target-Bedingung zu einem automatischen Abruf der Prime-Reaktion kommt. Dies impliziert, dass die Prime-Target- und die Prime-Flanker-Information in einem zusammenhängenden Paket gespeichert werden müssen. Im folgenden Probe wird das Target sofort mit der Prime-Reaktion verknüpft, da es mit dem Prime-Distraktoren und somit mit einem Teil der encodierten Prime-Episode übereinstimmt. Es ist zu beachten, dass bei dieser Gedächtnistheorie keinerlei Differenzierungsprozesse im Rahmen der selektiven Aufmerksamkeit ablaufen. Sie steht demnach im Widerspruch zur Inhibitionstheorie, in der die selektiven Aufmerksamkeitsprozesse und der nP-Effekt direkt miteinander zusammenhängen. Es fällt ein weiterer Unterschied auf: Während bei der Inhibition die zeitliche Richtung des Effekts vorwärts gerichtet ist, also vom Prime zum Probe ausgehend, so zielt er beim episodischen Wiederabruf in die entgegengesetzte Richtung. Hier verläuft der Effekt vom Probe zum Prime rückwärts gerichtet.

Bezogen auf Studienexperimente mit dem Eriksen Flanker Task bedeutet dies, dass ein Proband aus seiner Erfahrung mit vorangegangenen Trials nach und nach Lösungsprogramme für jede Testbedingung entwickeln müsste. Demnach müsste man diesen Effekt im Aufgabenverlauf deutlich nachweisen können, da die Probanden mit jedem absolvierten Trial an Erfahrungen gewinnen und Lösungswege abspeichern müssten. Dies hätte zur Folge, dass sich ihre Leistung im Testverlauf steigern müsste, da nach und nach mehr abrufbare Lösungsprogramme im

Gedächtnis zur Verfügung stehen müssten. Genau dieses testeten Neill et al. 1992 in einem Experiment, in dem sie das Zeitintervall zwischen Prime und Probe verlängerten. Es konnte tatsächlich eine Abnahme des nP-Effekts beobachtet werden, was darauf hindeutet, dass das wiederholte Auftreten eines Reizes die Gedächtnisspur verstärkt. Zu beachten ist jedoch, dass es in der erwähnten Studie auch zu einer Verlängerung der Reaktionszeiten gekommen ist. Passen einzelne aufeinanderfolgenden Antworten jedoch nicht zusammen, vergrößert sich der Effekt, was Lowe (1979) schon früh im Zusammenhang mit der Fähigkeit, Strategien während einer Aufgabenbewältigung zu entwickeln, beschrieb. Er konnte zeigen, dass sich das nP vergrößerte, je höher die Rate der Distraktor-zu-Target-Wiederholungstrials war. Kane et al. (1997) konnten diesen Effekt auch anhand eines anderen Priming-Paradigmas replizieren. Sie postulierten, dass das nP deshalb zu Stande komme, weil der Mensch positiv erfahrene Ereignisse speichert und danach strebt, in wiederkehrenden Situationen davon zu profitieren. In den meisten Fällen, besonders auf den Alltag bezogen, mag diese Erfahrungs-Strategie durchaus das Leben vereinfachen. Ist eine Antwort jedoch nicht kompatibel zu einer gespeicherten, so kann der automatische Abruf dieser Antwortspur auch unangemessen sein und die Beantwortung eher behindern, wodurch das nP verursacht wird (Rothermund et al. 2005). Es scheint also, als könne die Strategiebefolgung nicht kontrolliert an-oder abgeschaltet werden und als komme es automatisch zum Wiederabruf gespeicherter Informationen vergangener Episoden. Laut Rothermund et al. (2005) komme es nicht nur bei der Wiederholung des Targets zum Abruf der Gedächtnisspur, vielmehr lösen auch wiedererscheinende Distraktoren eine solche Reaktion aus. So kann auch das wiederholte Auftreten eines Distraktors zu einem automatischen Wiederabruf der Reaktion auf ein Target führen, welches den Distraktor im vorhergehenden Trial begleitet hat. Wird ein Prime-Distraktor im Probe als Target wiederholt, so konnte eine erleichterte Beantwortung im Probe-Trial beobachtet werden, wenn in beiden Trials die Reaktion auf den Stimulus identisch war. Dieser Fall tritt ein, wenn z.B. im Eriksen Flanker Task alle Flanker eines kgr. Primes nach rechts zeigen und mit der identischen Reaktion verknüpft sind. Folgt dem ein ikgr. Probe, in dem das Target wieder ein

nach rechts zeigender Flanker ist (also wie das Target des Primes), die Distraktoren hingegen nach links zeigen, so kann die zum Probe-Target kompatible Prime-Distraktorspur die Reaktion unterstützen und beschleunigen.

Ein wichtiger Unterschied in dieser sogenannten *response-retrieval*-Theorie z.B. zur Inhibitionstheorie ist die Gegebenheit, dass in dem Fall alle dargebotenen Stimuli mit einer Reaktion verknüpft werden und auch all diese Informationen wieder abgerufen werden können. Für das Target wird also ein aktiver Reaktions-Befehl hinterlegt, während die Distraktoren aktiv mit Reaktions-Sperre verknüpft werden. Der Unterschied zur Inhibition ist, dass bei der Inhibition eine komplette Sperrung der Teilnahme der Distraktoren am Verarbeitungsprozess vorliegt, während sie bei der *response-retrieval*-Theorie aktiv mit einem Befehl assoziiert werden, welcher ebenso wiederabgerufen werden kann. Aufgrund der zeitlich parallelen Präsentation der Stimuli postulierten Rothermund et al. eine Assoziation aller gegebenen Objekte mit der Reaktion (Rothermund et al. 2005). Der Konflikt betrifft hierbei die Differenz zwischen der im Prime-Trial geltenden Reaktionssperre und der folglich im Probe geforderten Antwort, die eine aktive motorische Reaktion erfordert. So wird auch hier der nP-Effekt erklärt, welcher bei Distraktor-zu-Target-Wiederholung auftritt.

Geht man davon aus, dass im Laufe der Zeit Daten wieder verloren gehen oder vergessen werden, müsste es dennoch, abhängig vom Zeitfenster, zum nP kommen. DeSchepper und Treisman (1996) konnten diese Vermutung bestätigen. Sie prüften dies, indem sie zwischen Prime und Probe ein Zeitintervall von einem Monat vergehen ließen. Das lange Zurückliegen einer Episode erschwerte den Wiederabruf der Gedächtnisspur. Der Effekt ist in diesem Fall sicherlich nicht auf die bis zu diesem lang verzögerten Zeitpunkt anhaltende Inhibition zurückzuführen und fällt letztendlich auf die Gedächtnisfunktion zurück. Wie lange das Hirn auf die Spuren zurückgreifen kann und ob dabei die jeweils aktuellste Bahnung bevorzugt wird, bleibt bislang unklar.

Ein weiterer Aspekt, nämlich inwiefern sich Ergebnisse von Aufgaben, bei denen die Probanden unter Zeitdruck gesetzt wurden, anhand der episodischen Wiederabruftheorie begründen lassen, wurde untersucht. Fox (1995) fand heraus, dass bei

unter Zeitdruck gelösten Aufgaben kein nP sondern gar ein positiver Effekt beobachtet werden konnte. Eine mögliche Erklärung für den ausbleibenden nP-Effekt könnte sein, dass den Probanden unter Druck nicht genügend Zeit für die En- und Dekodierung zur Verfügung steht. Im Prime reicht die Zeit nicht aus, die aufgenommen Reize ausreichend zu verarbeiten, während im Probe das Zeitfenster zu gering ist um bereits vorhandene Lösungsprogramme abzurufen. Ob es unter dieser Bedingung überhaupt zur Fertigstellung eines abrufbaren Programms kommt ist nicht geklärt. Auch wieso es gar zu einer erleichterten Beantwortung im Sinne des positiven Primings kommt bleibt nach dieser Theorie unklar.

Tipper (2001) ergänzte die Theorie, indem er angab, dass es nicht zwangsläufig zu einem Konflikt der beiden bis hier beschriebenen Theorien kommen muss um den nP zu erklären. Vielmehr verknüpft er beide Erklärungsansätze und beschreibt einen dualen Ablauf der Prozesse. Dabei spielt die Aufmerksamkeit während der Auswahl des Targets im Prime eine wichtige Rolle, da diese gesammelte Information das Antwortverhalten im Probe beeinflusst. Im Probe hingegen beruht der Prozess auf der Gedächtnisfunktion, anhand derer der Wiederabruf der bereits gespeicherten Daten aus vorangegangenen Episoden ablaufen kann.

1.1.4.3 Temporale Diskriminierungs-Theorie

Einen Erklärungsansatz, der sich weder auf die Gedächtnisfunktion noch auf den Inhibitionsprozess stützt, boten Milliken et al. (1998). In verschiedenen Experimenten versuchten sie die Ursache des nP-Effekts zu ergründen. Beispielsweise zeigten sie ihren Probanden in einem Prime-Display für 200 ms ein weiß geschriebenes Wort, welches die Probanden ignorieren sollte. Kurz darauf wurde ihnen ein rot geschriebenes Target präsentiert, auf welches reagiert werden sollte, während dieses von einem grün geschriebenen Distraktorwort unterlegt wurde. Trat nun das zu ignorierende Prime-Wort im Probe-Trial als zu beantwortendes Target auf, so verzögerte sich die Reaktion, und ein nP-Effekt konnte beobachtet werden. In diesem Fall konnte der Effekt nicht durch eine anhaltende Inhibition erklärt werden, da dem Prime-Stimulus keine Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Vielmehr begründeten Milliken et al. das Phänomen

anhand eines ablaufenden Vergleichsprozesses zwischen zwei aufeinanderfolgenden Trials. Wird erkannt, dass das Probe-Target nicht mit dem des vorangegangenen Primes übereinstimmt, so wird es als unbekannt eingestuft. Der Abgleichprozess sei letztendlich für den zeitlichen Mehraufwand verantwortlich. Die Forscher integrierten sowohl Ansätze aus der episodischen Wiederabruf-Theorie als auch Elemente der Inhibitionstheorie. Zum einen kommt es zum Abruf bereits gespeicherter Informationen über das Probe-Target aus der dafür angelegten Gedächtnisspur. Zum anderen erfolgt sein sofortiger Scan, ob es bereits bekannt oder unbekannt ist. Zu beachten ist hierbei, dass die visuell aufgenommenen Prime-Stimuli unabhängig von der Absicht des Probanden scheinbar automatisch in die Verarbeitung mitaufgenommen werden müssen. So scheint es plausibel, dass hierbei Inhibitionsmechanismen am Verarbeitungsprozess beteiligt sind, durch welche der zu ignorierende Prime-Stimulus aktiv mit einem „ignoriere-Befehl“ verknüpft wird (Tipper 2001). Des Weiteren muss beachtet werden, dass der nP-Effekt lediglich dann zu beobachten war, wenn das Prime-Display ignoriert werden sollte. Galt es den Prime-Stimulus aktiv betrachten, so konnte kam es hingegen zu einem pP-Effekt. Ein wichtiger Unterschied der Inhibitionstheorie zur Temporalen Diskriminierungs-Theorie ist, dass die letztere nicht auf Selektionsmechanismen beruht, welche das Folgeverhalten bestimmen (Tipper 2001). Allerdings gibt es auch bei dieser Theorie Kritikpunkte. Wurde ein Distraktor im Prime ignoriert und erscheint im Probe als Target, so wird er zunächst wie beschrieben als unbekannt eingestuft. Der nP-Effekt wird assoziiert mit der Erkennung der Differenz zwischen Prime und Probe. Sobald das neue Target identifiziert und verarbeitet wurde, müsste eine für ihn eigens zutreffende Gedächtnisspur angelegt werden. Da in Studienexperimenten die Variationen der Stimuli innerhalb eines Tests begrenzt sind, sollte sich im Testverlauf ein Kontingent an Gedächtnisspuren für alle im Experiment vorkommenden Reize bilden. Ist nun jeder Reiz einmal vorgekommen, dürfte kein Reiz mehr als unbekannt gelten und der nP-Effekt müsste nach dieser Theorie im Testverlauf abnehmen bis ganz verschwinden. Sogar ein Übergang zum positiven Priming-Effekt wäre zu erwarten. Die temporale Diskriminierungs-Theorie bezieht sich aber nur auf den Fall, dass es immer wieder zur Neu-Erkennung von

Stimuli kommt und impliziert, dass Experimente, in denen ausschließlich sich nicht wiederholende Reizen präsentiert werden, zu stärker ausgeprägten nP-Effekt führen. Weitere Studien sind nötig um die Theorie direkt auf unterschiedliche Studienergebnisse anwenden zu können und um eindeutige Anhaltspunkte für ihre Begründung oder Widerlegung zu finden.

Bis heute existiert in der Grundlagenforschung des Phänomens keine Einigkeit darüber, mit welcher der besagten Theorien der nP-Effekt zu begründen ist. Lediglich über die sichere Reproduzierbarkeit und seine Generalität unter zahlreichen Test-Varianten ist man sich einig. Dazu gehörten beispielsweise die Benennung von Objekten oder Bildern (Tipper 1985; Allport et al. 1985), Wörtern (Kane et al. 1994), Buchstaben (Neill et al. 1990; Neumann und DeSchepper 1992), oder von Zahlen (Driver und Tipper 1989). Auch bei Variationen der Aufgabenstellungen wie z. B. beim Zählen (Driver und Tipper 1989), bei Matching-Aufgaben (Neill et al. 1990), bei lexikalischen Entscheidungen (Yee 1991), bei Target-Lokalisationsaufgaben (Tipper et al. 1990, 1990) oder beim Matching sinnloser Objektformen (DeSchepper und Treisman 1991) wurde das Phänomen beschrieben. Die stärksten und bislang anerkanntesten Theorien stellen immer noch die Inhibitions- und die Gedächtnistheorie dar. Es wird weiterhin versucht, wie auch schon von Tipper (2001) beschrieben, eine Kombination beider Modelle zu erstellen statt einen Ausschluss einer Theorie zu erzielen. Dennoch hilft es auch alternative Erklärungsansätze mit in die Betrachtung einzubeziehen, um Ereignisse nicht falsch zu interpretieren und differente Ursachen nicht zu übersehen.

1.2 Gehirn

1.2.1 Postnatale Entwicklung des Gehirns

Das menschliche Gehirn unterliegt unter dem Umwelteinfluss einer fortwährenden Entwicklung aus progressiven und regressiven Prozessen. Obwohl es bereits mit dem 6. Lebensjahr ca. 90 % seiner Gesamtgröße erreicht hat, kommt es nie zu einem Stillstand (Baars und Gage 2007). Postnatal vervierfacht sich sein Volumen, wobei es

nicht zu einer Vermehrung von Nervenzellen, sondern ihrer Dendriten kommt (Toga et al. 2006). Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Entwicklungsfortschritt verschiedener Hirnregionen im Altersverlauf. Die additiven und regressiven Phasen einzelner Regionen finden während unterschiedlicher Zeitfenster statt. Beeinflusst werden sie von der individuellen Erfahrung aus kognitiven Prozessen, Sinneswahrnehmungen oder individuellen Lernprozessen, welche in der Kindheit bis hin zu den jungen Erwachsenenjahren gesammelt wurden. Parallel kommt es zur Ausprägung dendritischer und synaptischer Verzweigungen.

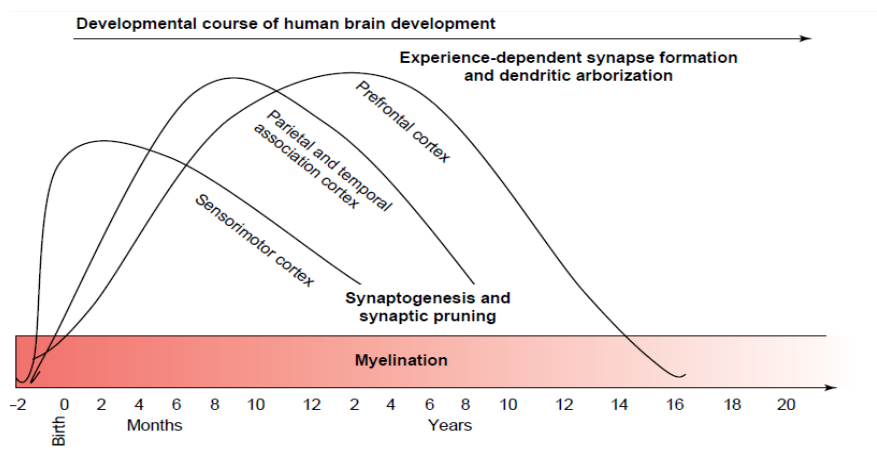


Abb. 1: Zeitliche Abfolge der Gehirnentwicklung.

Das menschliche Gehirn unterliegt einem fortwährenden Entwicklungsprozess. Dabei werden einige Hirnregionen früher ausgebildet als andere. Die Abbildung zeigt die postnatalen regionalen Veränderungen der Synapsendichte und die Myelinisierung der Neuronen. Die zeitliche die Entwicklung des sensorimotorischen Kortex, welcher für die Verarbeitung visueller und auditorischer Reize verantwortlich ist, des parietalen und temporalen Assoziationskortex sowie des präfrontalen Kortex, welcher die exekutiven Funktionen und Aufmerksamkeitsprozesse steuert, wird illustriert (Thompson und Nelson 2001; Casey et al. 2005). Die Verwendung der Illustration erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Thompson, RA (original Grafik, Seite 8) und Casey, BJ (modifizierte Grafik, Seite 105).

Als erstes entfalten sich die Regionen mit den basalsten Aufgaben wie der Umsetzung der Sinneswahrnehmung und der Bewegung. Es folgt die Entwicklung der parietalen und temporalen Areale in der Pubertät (11-13 Jahre), welche für die Orientierung und Sprachentwicklung von Bedeutung sind. Zuletzt kommt es zur Reifung des PFC, welcher erst im Erwachsenenalter vollends entwickelt ist, jedoch einige der wichtigsten Funktionen enthält (Davies et al. 2004; Tamnes et al. 2013). Je weiter dieser Bereich ausgereift ist, desto höher ist auch die Funktionsleistung des Arbeitsgedächtnisses (Brocki und Bohlin 2004). Brocki und Bohlin zeigten aufsteigende Leistungen des Arbeitsgedächtnisses bei Kindern von 9 bis 19 Jahren.

Auch die exekutiven Fähigkeiten variieren deutlich bei verschiedenen Altersgruppen, was anhand schlechterer Leistungsergebnisse bei Kindern und älteren Menschen im Vergleich zu jungen Erwachsenen nachvollzogen werden kann (Zelazo et al. 2004). Insgesamt unterliegt die Fähigkeit des logischen Denkens einem Entwicklungsprozess, welcher in der jungen Kindheit beginnt und bis in das Erwachsenenalter hineinreicht (Ferrer et al. 2009; Wendelken et al. 2011).

Auch Veränderungen der Dichte der grauen (Nervenzellkörper) sowie der weißen Substanz (Axone mit Myelinscheiden) prägen die Entwicklung des menschlichen Gehirns. Die graue Substanz des Frontallappens erreicht ihr Maximum erst im Alter von 11-12 Jahren, im temporalen Bereich mit ca. 16 Jahren und in parietalen Hirnregionen erst mit einem Alter von ca. 11 Jahren (Giedd et al. 1999) (siehe Abb. 2). Zu beachten ist, dass Regionen, welche mit basalen Funktionen wie dem sensorische und motorischen System assoziiert sind, früher reifen als Areale mit komplexen, exekutiven Funktionen wie der Entscheidungsfindung, Inhibition, dem Gedächtnis und der Handlungskontrolle.

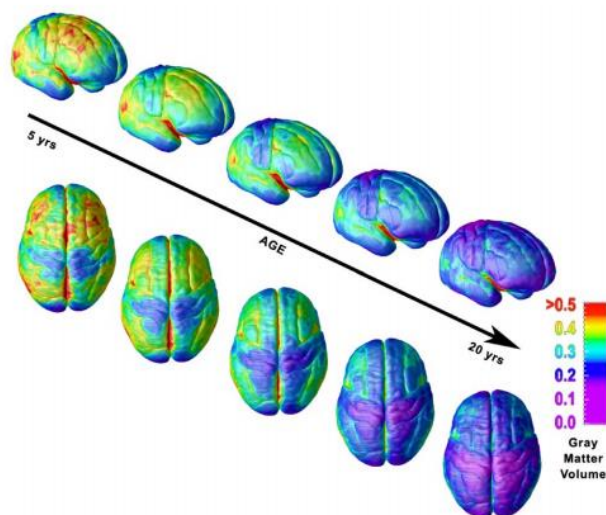


Abb. 2: Darstellung der Veränderung der kortikalen Dicke der grauen Substanz im Zeitverlauf.

Dreizehn Kinder wurden über eine Zeitspanne von 15 Jahren alle zwei Jahre longitudinal im MRT gescannt. Die verwendete Einheit stellt die Dichte der grauen Substanz dar, welche definiert ist aus der Proportion von grauem Substanzgewebe innerhalb eines 15 mm-Radius zentriert auf die kortikale Oberfläche (Gogtay et al. 2004), Seite 8178.

Die Entwicklung der weißen Substanz hingegen unterliegt in allen Hirnregionen einer gleichermaßen fortwährenden Zunahme vom Kindes- bis hin zum späten Erwachsenenalter (Bartzokis et al. 2001; Tamnes et al. 2013). Parallel gewinnen im Laufe des Lebens auch die synaptischen Verschaltungen an Dichte. So kommt es zu einem ständigen Aufbau neuer Verknüpfungen, während veraltete Bahnen abgebaut werden. Das Ergebnis ist ein effizientes Netzwerk millionenfacher Verknüpfungen, welches während des gesamten Lebens kontinuierlich remodelliert wird (Toga et al. 2006). Das Hirn des Homo Sapiens entwickelt sich im Vergleich zu anderen Primaten sehr langsam, wodurch es genügend Zeit für die Integration von Erfahrungen hat.

Einer der wichtigsten Komponenten der Informationsverarbeitung und des logischen Denkens ist die Schnelligkeit, ebenfalls ein Faktor, welcher sich im Laufe der Entwicklung verändert (Salthouse 2005; Grammer et al. 2014). Die individuelle Schnelligkeit ist dabei abhängig von der Weiterleitungsgeschwindigkeit neuronaler Signale von und zu unterschiedlichen Hirnarealen. Einer der wichtigsten Faktoren ist dabei der Myelinisierungsgrad der Nervenzellen. Je dicker die fetthaltige Schicht um die Axone (weiße Substanz) ist, desto schneller und präziser können Signale gesendet werden und desto besser sind kognitive Fähigkeiten und das logische Denken ausgeprägt (Thomason und Thompson 2011; Ferrer et al. 2013). Auch die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses nimmt Einfluss auf die Geschwindigkeit und die Genauigkeit bei der Bewältigung von Aufgaben (Kail und Ferrer 2007).

Da der PFC und der dazu gehörenden ACC für die Ausübung der exekutiven Funktionen wie die Inhibition handlungsirrelevanter Reize verantwortlich sind, zieht sich auch deren vollständige Entfaltung bis dahin. Ein Zusammenhang zwischen dem Entwicklungsfortschritt des ACCs und der Leistung von Kindern bei der Ausübung exekutiver Funktionen konnte bereits gezeigt werden (Tamnes et al. 2013). Auch die Anzahl dopaminerger Verschaltungen und der Dopamin-gesteuerte Metabolismus nehmen mit dem Alter zu (Lambe et al. 2000). Die unterschiedlichen Entwicklungsfortschritte werden als Hauptursache für Verhaltensdifferenzen zwischen Kindern und Erwachsenen gesehen (Rothbart und Posner 2001). Dieses Hintergrundwissen ist bei der Auswertung von Testergebnissen selektiver Aufmerksamkeitsstudien von unterschiedlichen Altersklassen von immenser

Bedeutung. Starke intraindividuelle Unterschiede machen es jedoch schwer, genaue Angaben zu Entwicklungszeitpunkten einzelner Regionen zu geben.

Bei Erwachsenen sind aktive Aufmerksamkeitsprozesse in den frontalen und parietalen Hirnregionen besonders der rechten Hemisphäre lokalisiert. Exekutive Abläufe hingegen finden im anterioren cingulären und lateralen präfrontalen Kortex statt (Konrad et al. 2005). Konrad et al. verglichen diese bekannten Regionen Erwachsener Probanden in einer fMRI-Studie mit denen von Kindern im Alter von 8 bis 12 Jahren. Das Ergebnis zeigte deutliche Unterschiede in den besagten Regionen beider Gruppen. Besonders im rechten frontalen cingulären Gyrus erwiesen sich Differenzen, was die Forscher anhand unterschiedlicher Entwicklungsstadien der beiden Altersgruppen begründen. Es konnte auch gezeigt werden, dass Kinder bei kognitiven Kontroll-Aufgaben, welche den PFC fördern, wesentlich diffuser und weiter verstreute Hirnaktivitäten aufweisen als Erwachsene (Casey et al. 2005). Diese Potenziale beziehen erst mit dem Heranreifen eigene Herdgebiete. In einer Go/NoGo-Studie zeigten Casey und sein Team bei Kindern im Gegensatz zu Erwachsenen eine erhöhte Aktivität im PFC, welche mit der erfolgreichen Inhibition irrelevanter Reize assoziiert war. Bei den Erwachsenen hingegen kam es zu einem Potenzialanstieg, sobald die Testbedingung eine erhöhte Inhibitionsrate forderte, während das Potenzialniveau bei den Kindern für alle Testbedingungen gleich blieb. Es wird davon ausgegangen, dass der individuelle Entwicklungsstand des PFC ausschlaggebend für die Inhibitionsfähigkeit ist. Erst während der Entwicklung reifen die für Performance wichtigen Hirnareale aus und definieren Fähigkeiten wie Schnelligkeit, Konzentration und Genauigkeit (Baars und Gage 2007). Auch konnten bei Erwachsenen höhere Aktivitäten im parietalen Kortex und im inferioren frontalen Gyrus beobachtet werden, während es bei den Kindern eher zu Potenzialen im temporalen Bereich und im superioren frontalen Gyrus kam (Casey et al. 2005). Die Wissenschaftler schließen darauf, dass die Kinder noch unreife fronto-parietale Netzwerke aufweisen, was bei kognitiven Kontrollaufgaben zu den Topografieunterschieden führt. Das Aufmerksamkeitssystem der Kinder funktioniert zwar, ist aber noch nicht vollständig ausgereift.

1.3 Fehlerverarbeitung und Hirnregionen

1.3.1 ACC

In verschiedenen Studien zur Fehlerverarbeitung (*error processing*) konnte nachgewiesen werden, dass einige Hirnregionen eine größere Rolle spielen als andere. Als *error-processing* wird hier die Fähigkeit des Systems bezeichnet, gemachte Fehler zu erkennen und diese Fehlerinformation zur Vermeidung von Folgefehlern zu benutzen, um seine Leistung zu optimieren (Ullsperger und Falkenstein 2004). Kommt es bei diesem Prozess zu Komplikationen, sind typische schnell gemachte Fehler die Folge, welche sich in der *error-negativity* Ne widerspiegeln (van Veen und Carter 2006). Besonders dem Frontalhirn werden dabei wichtige Aufgabenbereiche zugeschrieben. Elektrophysiologische und funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRI)-Studien zeigten, dass die wichtigsten Mechanismen der Fehlererkennung und Verarbeitung im ACC stattfinden, wo Handlungsabsichten schließlich in kontrollierte motorische Aktivitäten umgesetzt werden (Ullsperger und Cramon 2001; Holroyd et al. 2004; Segalowitz und Dywan 2009). Er gehört zum kortikalen Teil des limbischen Systems und bildet durch seine zahlreichen Projektionen zu anderen Gehirnarealen eine Schnittstelle für emotionale, kognitive und exekutive Prozesse. Laurens et al. (2003) zeigten, dass der ACC aus zwei funktionellen Untereinheiten besteht, wovon der dorsale Anteil verantwortlich für die selektive Aufmerksamkeit, die Fehlerverarbeitung, die Ausübung exekutiver Funktionen und vor allem für die inhibitorische Kontrolle ist (Bush et al. 1998; Braver et al. 2001). Hier kommt es auch zu Fehlererkennung sowie zur Aufmerksamkeitslenkung auf relevante Stimuli, während irrelevante Reize unterdrückt werden. Der rostral-ventrale Anteil übernimmt die Bewertung emotionaler Informationen und die Regulierung gefühlsbetonter Reaktionen (Bush et al. 2000). Kommt es zu einem Fehler, produzieren die Basalganglien ein Signal, welches über das limbische System zum ACC weitergeleitet wird. Er gilt als Generierungsort Ereignis-korrelierter Potenziale (ERP) und es kommt letztendlich zu Entstehung des fehlerspezifischen negativen Potentials Ne. Doch nicht nur der ACC selbst, sondern auch seine umfangreichen Verbindung zum PFC ist wichtig für

zukünftige Handlungsregulierungen auf Basis der aktuellen Performance. Er ist ein Empfangsschalter sämtlicher für die exekutiven Handlungen wichtigen Informationen und erhält dafür Datensätze aus dem orbitofrontalen Kortex oder aus Bereichen des limbischen Systems. Kommt es zu einer Konfliktsituation, kann hier eine erhöhte Aktivität gemessen werden, welche nach dem Begehen eines Fehlers sogar noch stärker ist, weshalb man von einem Mitwirken des ACC an der Fehlerdetektion ausgeht (Botvinick et al. 2001). Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass der ACC möglicherweise auch als Warnsystem fungiert, wodurch Ausgangsbedingungen für das Zustandekommen eines Fehlers aufgedeckt werden und daraufhin unerwünschte, fehlerhafte Reaktionen vermieden werden können. Dieses Frühwarnsystem basiert vermutlich auf einem individuell erworbenen Erfahrungsschatz eines jeden Probanden und müsste demnach auch Unterschiede bei den jeweiligen Altersgruppen aufweisen (Brown und Braver 2005). Auch beim Lernen erkennt man in ihm unterschiedliche Aktivitätsmuster. Forscher zeigten während eines im Stroop-Tests ausgelösten Antwortkonflikt eine stärkere neuronale Aktivität zu Beginn der Aufgabe, während im Testverlauf eine Aktivitätsabnahme verzeichnet werden konnte (Bush et al. 1998). Man geht davon aus, dass im frühen Lernstadium Belohnungen und Fehler-Informationen für die Strategiebildung genutzt werden um in Folgesituationen angemessener reagieren zu können (Holroyd und Coles 2002). Die Belohnung oder Bestrafung wird vom dopaminergen System gesteuert.

1.3.2 Mesencephalisch-dopaminerges System

Das mesencephalisch-dopaminerge System des Mittelhirns (mdS) besitzt einen großen Einfluss auf die Generierung evozierter Hirnpotenziale. Es spielt erwiesenermaßen die Hauptrolle in der Entstehung der Ne (Holroyd und Coles 2002). Dopamin gilt als ein wichtiger Neurotransmitter des Belohnungssystems und wird auch als „Glückshormon“ bezeichnet. Der zu den biogenen Aminen gehörende Katecholamintransmitter beeinflusst das Motivations- und Lernverhalten und ist unabdingbar für eine Vielzahl lebensnotwendiger Regulierungs- und Steuerungsvorgängen im Organismus (Ullsperger et al. 2010). Die in Arbeitsgedächtnis

hinterlegten Informationen werden bei Bedarf wiederabgerufen und gelangen zum PFC, welcher von dopaminergen Fasern innerviert wird. Somit kommt dem Stoff nicht nur eine Wächterfunktion zu, welche den Zugang von relevanten Kontextinformationen in das aktive Gedächtnis kontrolliert. Gleichzeitig übt er eine Lernfunktion aus, unter der das System erlernt, welche Daten für den aktuellen Kontext tatsächlich relevant sind und welche nicht, und übernimmt auf diese Weise die Steuerung kognitiver Kontrollprozesse (Braver und Cohen 2000). Eine Abnahme der Dopaminkonzentration im dorsolateralen präfrontalen Kortex führt zur Einschränkung des Arbeitsgedächtnis und der Inhibitionsleistung (Diamond et al. 2004). Eine durch Degenerationsprozesse bedingte Abnahme des Amins wird auch als Erklärung für die Inhibitions- und Konzentrationsleistungsminderung älterer Menschen postuliert. Zudem spielt Dopamin für die postnatale Entwicklung des dorsolateralen Kortex während der ersten zehn Lebensjahre eine wichtige Rolle.

Auch das mdS wird im engen Zusammenhang zur Fehlerverarbeitung gesehen. Begeht der Proband einen Fehler, wird ein negatives Lern-Signal zum anterioren cingulären Kortex übermittelt, wo schließlich die Ne generiert wird. Hier werden ebenso positive Lernsignale benutzt, um die Entwicklung adaptiver motorischer Handlungsprogramme zu entwickeln, welche folgende Episoden erleichtern und beschleunigen (Holroyd und Coles 2002). Es scheint also, als ob der Lernprozess von zwei korrespondierenden Systemen gesteuert wird: das mdS sendet nach einem Fehler ein negatives *reinforcement-learning* Signal zum ACC, wo folglich die fehlerspezifische Ne generiert wird.

Das limbische System spielt eine entscheidende Rolle bei Lernprozessen, zu dessen Bestandteilen der Nucleus accumbens gehört. Dieser ist ein Teil des Belohnungssystems und wird oft mit der Verhaltenskonditionierung verknüpft. In ihm befinden sich dopaminerge Rezeptoren. Führt man eine Aufgabe aus und wird anschließend dafür belohnt, so schüttet das Hirn den Neurotransmitter Dopamin aus, welcher in uns ein Glücksgefühl auslöst. Aufgrund dieser Stimmungs-erheiternden Wirkung wird das Verhaltensmuster abgespeichert mit dem Ziel, die Handlung gleichermaßen wiederholen zu können und erneut belohnt zu werden. Werden die im Nucleus Accumbens befindlichen Rezeptoren durch dopaminerge Afferenzen stimuliert,

empfindet man das Gefühl von Euphorie und Glück. Nach dem gleichen Mechanismus wirken auch Drogen wie Opiate oder Kokain.

Das dopaminerge System ist jedoch erst im jungen Erwachsenenalter vollständig entwickelt und erreicht dann ein stabiles Niveau. Lambe et al. berichten von einer immensen Zunahme dopaminerg-innervierter Pyramidenzellen des PFC mit einem Maximum in der Pubertät (Lambe et al. 2000). Ein Abfall der Dopaminausschüttung kann am Ende der jugendlichen Entwicklungszeit beobachtet werden. Diese Modulation verursacht in der Entwicklungsphase deutliche Schwankungen in der Amplitude der Ne und kann der Grund für das Fehlen einer stark ausgeprägten Ne bei den jugendlichen Probandengruppen mancher Studien sein. Man muss beachten, dass sich auch der PFC und der ACC anatomisch, physiologisch und elektrophysiologisch erst relativ spät entwickeln, um Fehlinterpretationen bei der Auswertung der ERPs verschiedener Altersgruppen im direkten Vergleich zu vermeiden.

1.4 Elektrophysiologie

1.4.1 EEG

Das Elektroenzephalogramm (EEG) ist eine elektrophysiologische Methode um neurophysiologische Aktivitäten über einer definierten Gehirnregion nicht-invasiv zu registrieren und graphisch darzustellen. Gemessen werden dabei sowohl spontane als auch evozierte elektrische, postsynaptische Potenziale oberflächlicher kortikaler Pyramidenzellen, dessen apikalen Dendriten parallel zueinander verlaufen und senkrecht zur Hirnoberfläche stehen. Durch diese geometrische Anordnung der Dendriten kommt es zu einer Addition einzelner elektrischer Felder zu einem Dipol, wodurch die Messung zahlreicher synchron aktivierter Neuronen gewährleistet wird. Die postsynaptischen Potenziale der Pyramidenzellen sind die Folge der Aufnahme und Verarbeitung permanent auf den Organismus einwirkender Reize. Diese Reize lösen permanent physiologische Prozesse im Hirn aus, durch welche letztendlich motorische Reaktionen generiert werden. Um jedoch bestimmte evozierte Potenziale darstellen zu können, müssen diese zunächst von den Spannungs-

differenzen des Spontan-EEGs differenziert werden. Da diese durch einen Stimulus evozierten Änderungen des EEG-Signals im Vergleich zu spontanen Hirnaktivitätsschwankungen sehr klein sind, müssen Mittelwerte vieler auf denselben Reiz bezogene Potenziale gebildet (Averaging) und vom Spontan-EEG extrahiert werden. Die so ermittelte EEG-Kurve zeigt schließlich die Ereignis-korrelierten Potenziale (*event-related potentials*, ERP). Um eine Vergleichbarkeit von derart in verschiedenen Experimenten gewonnenen ERPs zu ermöglichen, werden meist die Grand Averages betrachtet, welche durch eine Mittelung aller ERP-Daten aller Probanden gebildet werden (Coles und Rugg 1995). Die graphische Darstellung der elektrischen Signale erfolgt durch Messung der Potentialdifferenzen elektrischer Felder zwischen den verschiedenen Ableitungspunkten. Das EEG ermöglicht die Ableitung dieser bioelektrischen Hirnaktivität anhand von Oberflächenelektroden, die an definierten Punkten auf der Kopfhaut angebracht werden. Mit dem EEG lassen sich somit systematische Aspekte der Aktivität neuronaler Netzwerke zeitlich und räumlich erfassen. Es liefert wertvolle Informationen über die aktuelle Hirnaktivität und kann einzelne evozierte Hirnpotenziale lokalisieren und Fehlerhandlungen zuordnen. Durch diese Informationen können Rückschlüsse auf mentale Zustände wie Konzentration, Entspannung oder den Schlafphasen gezogen werden (Rothenberger 2009). Im Allgemeinen erfolgt die Aktivität dieser Netzwerke rhythmisch und pulsatil, so dass eine Einteilung verschiedener abgeleiteter Signale nach Oszillationsfrequenz und Amplitude nebst einer ungefähren Quellenlokalisierung möglich ist. In der Neuropsychologie kommt das EEG im Wesentlichen zur Aufschlüsselung zerebraler Aktivierungs- und Inhibitionsprozessen zum Einsatz. Die Positionierung der Elektroden basiert auf dem internationalen 10-20-Elektrodensystem nach Jasper (Jasper 1958) (siehe Abb. 3a). Das standardisierte System ermöglicht eine Vergleichbarkeit aller so aufgezeichneten EEGs. Es orientiert sich an vier festgelegten anatomischen Bezugspunkten, wobei die Ableitungen zu einzelnen Punkten in Bezug gesetzt werden: Nasion, Inion und jeweils bilateral präaurikulär. Die Strecke gemessen von rostral nach caudal vom Nasion zum Inion bezeichnet man mit 100%. Die erste Elektrode hat einen 10%igen Abstand zum Nasion, die nächsten werden in einem 20%igen Abstand zur jeweils vorherigen

platziert. Die letzte Elektrode besitzt wieder einen Abstand von 10 % zum Inion. Die gleiche Aufteilung erfolgt zwischen den beiden präaurikulären Positionen transversal (siehe Abb. 3a). Die Benennung der Elektroden erfolgt von anterior nach posterior: F= Frontal, C= Central, T= Temporal, P= Parietal, O= Okzipital und z= Mittellinie. Die geraden Zahlen beziehen sich dabei auf die rechte Hemisphäre, die ungeraden Zahlen auf die linke Hemisphäre (siehe Abb. 3b).

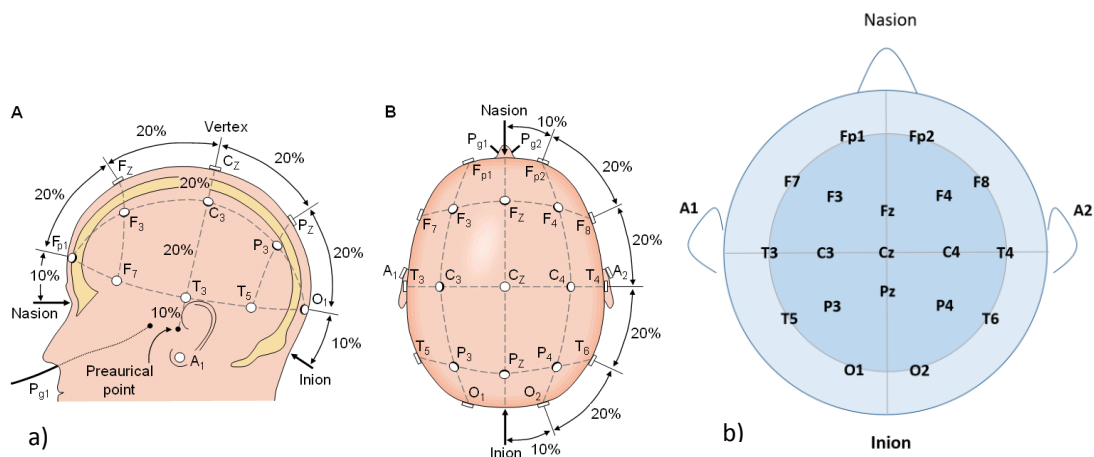


Abb. 3: Die Positionierung und Benennung der EEG-Elektroden nach dem 10-20 System.

a) Die Gesamtstrecke vom Nasion zum Inion bezeichnet man mit 100%. Die erste Elektrodenreihe wird in einem 10%igen Abstand zum Nasion (FPz) angelegt. Die weiteren Elektroden werden in einem Abstand von jeweils 20% zu vorherigen Elektrode platziert. Die letzte Elektrode weist wieder einen Abstand von 10% auf. (Malmivuo und Plonsey 1995) *Illustration aus der zur Vervielfältigung frei zur Verfügung stehenden Web-Edition, mit freundlicher Genehmigung von Oxford University Press, Chapter 13.* b) Die Benennung der Elektroden.

Im EEG lassen sich verschiedene sogenannte EEG-Bänder anhand von Potentialen unterschiedlicher Frequenzen unterscheiden. Typische Wellenformen sind Delta-(0,5-4 Hz), Theta-(4-7 Hz), Alpha-(8-13 Hz), Beta-(13-30 Hz) und Gamma-Wellen (>30 Hz). Sie verkörpern verschiedene Funktionszustände des Gehirns. Bei gesunden Erwachsenen lassen sich auf der Kopfhaut typische Potentiale zwischen 0.5-50 Hz mit einer Amplitude von zwischen 10-100 μ V messen (Basar 1999). Auftretende Potentialschwankungen sind ein Zeichen für motorische und kognitive Prozesse als Folge einer Reizaufnahme und -verarbeitung. Fehler, die beispielsweise während des Eriksen Flanker Tasks gemacht werden, lösen korrelierende Potentiale aus, die mithilfe des EEGs gemessen und visualisiert werden können.

1.5 ERP (Ereignis-korrelierte Potenziale)

Jegliche Reize, die auf einen Organismus einwirken, und die mit ihnen einhergehenden kognitiven Prozesse können über das EEG in Form von Ereignis-korrelierter Potenziale (ERP) nachvollzogen werden. Ein ERP ist eine bestimmte Form einer EEG-Welle, die entweder durch eine Sinneswahrnehmung evoziert, oder aber durch einen kognitiven Prozess erzeugt werden kann und eine auf einen Reiz bezogene Antwort des Gehirns verkörpert. Sie werden zeitlich zu ihrem Auslöser bezogen auf der Kopfhaut gemessen und durch die Addition ihrer Durchschnittswerte berechnet. Durch das mehrfache Wiederholen eines bestimmten Stimulus und das Erheben der darauf bezogenen evozierten Durchschnittspotenziale können nicht Ereignis-korrelierte Potenziale effektiv herausgefiltert werden. Die ermittelten Potenziale geben Aufschluss über elektrophysiologische Hirnfunktionen während der Wahrnehmung und ermöglichen die Untersuchung des kognitiven Auswahl- und Antwortverhaltens auf einen bestimmten Reiz. Die Analyse der ERPs gewann in der Erforschung der selektiven Aufmerksamkeit immer mehr an Bedeutung, da sie wertvolle Informationen über das zeitliche Auftreten verschiedener kognitiver Hirnpotenziale und dessen zeitlichen Zusammenhang zu ihrem Auslöser, sowie ihrer genauen Lokalisation liefern (Picton et al. 2000; Yordanova et al. 2004). Bereits in den 60er Jahren konnte der Forscher Rabbitt nach Fehlern verlängerte Reaktionszeiten der Probanden in Folgeaufgaben beobachtet, welche als *post-error-slowness* bezeichnet wurde (Rabbitt 1966). Man geht davon aus, dass das *post-error-slowness* die Zeitverzögerung für eine bewusste Strategieänderung nach Erkennen eines gerade begangenen Fehlers darstellt, die als Bestandteil des Fehler-Monitorings im Rahmen eines Lernprozesses für eine Verminderung der Fehlerquote sorgen soll (Gehring und Fencsik 2001).

Innerhalb des ERP-Verlaufs können Potenzialverläufe gemessen werden, welche dem Zeitpunkt vor oder nach einem Ereignis (Stimulus-Aufnahme oder Stimulus-bezogene Reaktion) zuzuordnen sind. Eine gute Untersuchung der Hirnpotenziale bieten Tests wie Go/NoGo Aufgaben oder Variationen des Eriksen Flanker Task. Sie eignen sich besonders gut, um möglichst viele Fehler zu provozieren und die damit

verbundenen Potenziale über das EEG in Form von Fehler-bezogenen ERPs darzustellen. Die Fehler-Verarbeitung ist im Vergleich zu korrekten Antworten durch charakteristische Komponenten gekennzeichnet, die sich in ihrer Latenz von der jeweiligen Antwort und Kopfhaut-Topographie unterscheiden. In dieser Studie werden die antwortbezogenen ERPs untersucht. So zeigen sich unmittelbar nach einem Fehler zwei verschiedene Hirnpotentiale mit unterschiedlichen Latenzen, Ladungen und Maxima, zum einen die *response-negativity* Ne (in der Literatur auch ERN genannt) und zum anderen die *response-positivity* Pe (siehe Abb. 4).

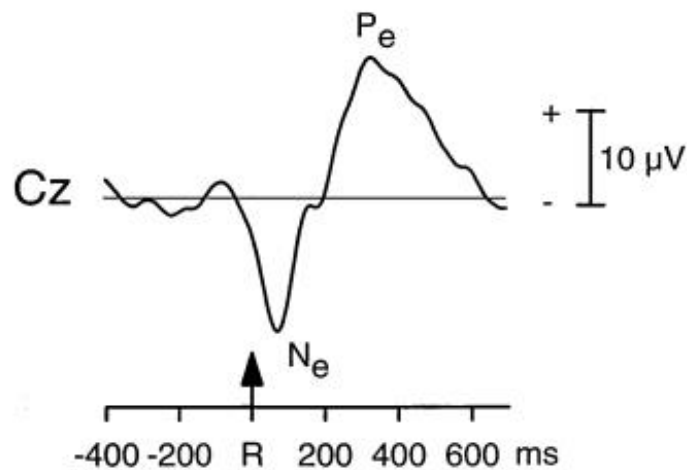


Abb. 4: Beispielhafter Verlauf eines ERPs.

Während des Flanker Tasks aufgezeichnete zeitliche Abfolge eines NEs und PEs nach Begehen eines Fehlers (R). Die Fehler-Negativität Ne ist der stark negative Ausschlag mit einem zentralen Maximum bei ca. 80 ms nach dem Begehen eines Fehlers (R). Die Fehler-Positivität Pe zeigt sich als ein positiver Ausschlag mit einem Maximum bei ca. 300 ms nach Begehen eines Fehlers (Falkenstein et al. 2000), Seite 92.

Man vermutet, dass Ne und Pe den Prozess der Fehlererkennung in Echtzeit repräsentieren und eine entscheidende Rolle beim Conflict-Monitoring spielen (Falkenstein et al. 2000; Albrecht et al. 2008). Dennoch geht man davon aus, dass beide Potenziale unterschiedliche Funktionen während der Fehlerverarbeitung haben.

1.5.1 Error-negativity „Ne“

Die *error-related-negativity* ist ein negatives ERP-Potenzial, welches etwa zeitgleich mit der Ausführung einer inkorrekten motorischen Reizantwort beginnt und ca. 80

ms nach Eingabe der Falschantwort bei Erwachsenen im fronto-zentralen Bereich (FCz) ihr Maximum erreicht (Falkenstein et al. 2000; Davies et al. 2004; Hoffmann und Falkenstein 2010; Hajcak 2012). Diese Hirnregion wird mit dem supplementären motorischen Areal assoziiert. Bei Kindern konnte ihre maximale Amplitude mehr posterior, an der Elektrode Cz gelegen, vorgefunden werden (Davies et al. 2004; Torpey et al. 2012). MRT- und EEG-Studien fanden ihren Generierungsort in den Strukturen des anterioren cingulären Kortex, einem Teil des limbischen Systems (O'Connell et al. 2007; Santesso und Segalowitz 2008; Vocat et al. 2008; Hoffmann und Falkenstein 2010). Über die Ursache ihrer Entstehung sind sich die Wissenschaftler bislang jedoch noch uneinig. Einerseits wird vermutet, dass sie die direkte Fehlererkennung in Echtzeit repräsentiert und während der Eingabe einer Falschantwort entsteht (Falkenstein et al. 1990; Scheffers et al. 1996; Coles et al. 2001). Zudem konnte gezeigt werden, dass Ne sowohl bei wahrgenommenen Fehlern vorkommt als auch dann aufzuweisen ist, wenn sich ein Proband nicht seiner gegebenen Falschantwort bewusst ist (Nieuwenhuis et al. 2001; Alexander und Brown 2011). Ihre Amplitude variiert mit dem Bewusstsein über das eigene Fehlerverhalten (Scheffers und Coles 2000). Sie verkörpert eine kognitive Antwortkontrolle im Rahmen der Verhaltenskontrolle sowohl nach Richtig- als auch nach einer Falschantwort, welche bei Falschantworten mit der Fehlerdetektion kombiniert wird (*error-detection-Hypothese*) (Falkenstein et al. 2000; van Veen und Carter 2006; Carter und van Veen 2007). Eine andere Theorie besagt, dass sie ein kognitiver Abgleich (Matching) zwischen gegebener und geforderter Antwort ist und sie somit einen Prozess darstellt, statt nur die bloße (kategoriale) Erkennung, dass eine Antwort eventuell falsch gewesen ist (*Mismatch-Hypothese*) (Falkenstein et al. 2000; Coles et al. 2001; Botvinick et al. 2004; Carter und van Veen 2007). Auch ihre Verkörperung eines Vergleichsprozesses zweier gegebener Antworten, welche auch nach richtig beantworteten Trials auftreten kann, wird herangezogen (Vidal et al. 2000). Neuere Forschungsergebnisse lassen vermuten, dass Ne ein Signal des dopaminergen Systems ist, welches nach einer fehlerhaften Antwort das Ausbleiben einer internen Belohnung verkündet (Holroyd und Coles 2002). Die beiden Forscher untersuchten den Zusammenhang, indem sie Ne durch Manipulation dopaminerge

Transmitter veränderten. Kommt es zum Einsatz von Dopamin-Antagonisten, so kann eine verringerte Ne-Amplitude beobachtet werden (Bruijn et al. 2006), während Dopamin-Agonisten zu einer Amplitudenerhöhung führen (Bruijn et al. 2004). Auch Inzlicht und Al-Khindi (2012) beschrieben das Phänomen als emotionale Reaktion auf einen Fehler. Der Zusammenhang zwischen der Ne, dem dopaminergen System und dem ACC kann also folgendermaßen erklärt werden: Die Ne wird generiert, sobald es nach einem Fehler zur Übermittlung eines negativen *reinforcement-learning*-Signals des Dopamin-Systems zum ACC gekommen ist. Die dopaminerge Steuerung der Ne ist ein wichtiger Aspekt in Hinsicht auf entwicklungsbedingte Unterschiede im Ausfall der Ne bei Kindern und Erwachsenen. Wurden Probanden instruiert, möglichst akkurat und gewissenhaft zu handeln, konnte eine Erhöhung der Ne-Amplitude beobachtet werden (Falkenstein et al. 2000; Gentsch et al. 2009). Unter Zeitdruck und auch bei erschwerten Aufgabenstellungen wurden hingegen verminderte Amplituden gemessen (Falkenstein et al. 1990; Gehring et al. 1993; Band und Kok 2000). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Kontext, in dem eine Antwort gegeben wird und auch sein Schwierigkeitsgrad von Belang sind (Hogan et al. 2005). Man kann vermuten, dass Ne auch unabhängig von Fehlern nach einem Antwortwechsel (RC) vorzufinden ist, da diese Situation eine erhöhte Aufmerksamkeit erfordert. Die Richtungsänderung des Folgetrials im Eriksen Flanker Task hat demnach einen Einfluss auf das Verhalten und erfordert eine spontane Verhaltensänderung. Die Verarbeitung dieser Veränderung sollte in der Amplitude der Ne nachvollziehbar sein.

Die hohe Heterogenität der Befundlage der vergangenen Jahre erweckte das Interesse vieler Forscher. Ergebnisse verschiedener Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Ne erst mit der Entwicklung reift und ihre Amplitude ihr Maximum erst im jungen Erwachsenenalter erreicht (Segalowitz et al. 2003). Lambe et al. (2000) vermuteten bereits, dass die für die Generierung der Ne verantwortlichen Hirnareale einen Reifeprozess durchlaufen. Diese Entwicklungseinflüsse testeten Davies et al. (2004), indem sie 124 Kinder und Jugendliche im Alter von 7 bis 18 Jahren und 27 Erwachsene im Alter von 19 bis 25 Jahren eine Eriksen Flanker-Aufgabe beantworten ließen, während ein EEG von ihnen geschrieben wurde. Die Stimuli bestanden aus

Buchstabenabfolgen, welche entweder kongruent (SSSSS; HHHHH) oder inkongruent (SSHSS; HSHHH) waren. Das Ergebnis zeigte eine signifikant größere Ausprägung der Ne bei den Erwachsenen im Vergleich zu den Kindern. Besonders innerhalb der Kinder- und Jugendgruppe konnte eine Zunahme ihrer Ne-Amplituden mit dem Alter beobachtet werden. Das fehlerbezogene positive Potenzial (Pe) fiel bei beiden Gruppen gleich aus. Außerdem zeigten die Erwachsenen generell schnellere Reaktionszeiten als ihre jüngere Kontrollgruppe und sie machten weniger Fehler. Die Ergebnisse weisen auf eine entwicklungsbedingte späte Ausbildung des ACCs und des dopaminergen Systems hin und implizieren, dass die dopaminerge Innervation pyramidaler Nervenzellen des PFC erst mit Beginn der Pubertät einsetzt. Neuere Forschungsergebnisse verschiedener Studien mit unterschiedlichen Flanker Tasks konnten diese Erkenntnisse unterstützen (Santesso et al. 2006; Wiersma et al. 2007; Ladouceur et al. 2007; Santesso und Segalowitz 2008; Torpey et al. 2012). Ladouceur et al. (2007) konnten bei Kindern unter 12 Jahren keine Ne feststellen, weshalb man davon ausging, dass die für die Generierung der Ne verantwortlichen Hirnregionen erst nach diesem Altersbereich ausreifen. Entgegen diesen Befunden fanden Wiersma et al. (2007) auch bei 7-11-Jährigen eine gleichermaßen ausgeprägte Ne. Aktuellere Studien konnten den Altersbereich, in dem eine Ne vorzufinden ist, sogar auf 4-6 Jahre senken (Torpey et al. 2012; Grammer et al. 2014). Bis heute bleibt der genaue Zeitrahmen, in dem es zum ersten Erscheinen einer Ne kommt, unklar. Dennoch ist zu beachten, dass auch Forschungsergebnisse vorliegen, bei denen es zu keinen signifikanten Differenzen der Ne zwischen Kindern und Erwachsenen kam (Richardson et al. 2011), so dass ein altersunabhängiges Auftreten der Negativität nicht auszuschließen ist und weiter untersucht werden muss.

1.5.2 Error-positivity „Pe“

Die Pe stellt neben der Ne einen weiteren Fehler-spezifischen Marker dar, welche als Konsequenz einer fehlerhaften Reaktion ca. 200-500 ms in Form eines positiven Potenzials mit einem zentro-parietalen Maximum (Elektrode Pz, Cz) auftritt (Falkenstein et al. 2000; Santesso et al. 2006; Torpey et al. 2012). Es wird

angenommen, dass Pe ebenfalls einen Teilprozess der Fehlerverarbeitung verkörpert, der jedoch unabhängig von Ne ist und im Gegensatz zu ihr nur dann auftritt, wenn ein Fehler bewusst wahrgenommen wurde (Falkenstein et al. 2000; Davies et al. 2004; Nieuwenhuis et al. 2001; Falkenstein 2004; O'Connell et al. 2007). Dies deutet darauf hin, dass sich die beiden Potenziale bezüglich ihrer Funktionen während der Fehlererkennung und Verarbeitung unterscheiden. Eine weitere Vermutung ist, dass sie die Anpassung an eine Antwortstrategie ist, nachdem ein Fehler wahrgenommen wurde (Nieuwenhuis et al. 2001).

Pe unterscheidet sich von Ne nicht nur in ihrem topographischen Auftreten und in ihrer Rolle im Fehler-Monitoring, sondern auch in ihrem Entstehungsort (Vocat et al. 2008). Sie wird im rostralen Teil des ACCs generiert (van Veen und Carter 2002; Vocat et al. 2008). Dieser Bereich ist bekanntermaßen für die Bildung von Emotionen verantwortlich. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Pe bei der Fehlererkennung mit einer emotionalen Prüfung eines Fehlers verknüpft ist (van Veen und Carter 2002; Falkenstein 2004). Über seine Bedeutung ist jedoch bisher weitaus weniger bekannt als über die Rolle der Ne.

Je höher der Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe ist, desto niedriger fällt- genauso wie bei Ne- ihre Amplitude aus (Falkenstein et al. 2000). Auch die Anzahl der gemachten Fehler übt einen Einfluss auf die Pe aus. Je mehr Fehler ein Proband während einer Aufgabe macht, desto niedriger ist seine Pe-Amplitude. Bleibt die Fehlerquantität hingegen gering, so ist sie erhöht (van Veen und Carter 2002). Ebenfalls beeinflusst die Einstellung des Probanden den Ausfall der Pe, sodass bei Kindern, die auf Genauigkeit achteten, eine stärker positive Pe beobachtet werden konnte (Torpey et al. 2012).

Studien konnten belegen, dass es sich bei Pe im Gegensatz zu Ne um kein altersabhängiges Potenzial handelt, welches auch schon bei jungen Kindern nachzuweisen ist und nicht im Laufe der Entwicklung zunimmt (Davies et al. 2004; Santesso et al. 2006; Wiersema et al. 2007; Santesso und Segalowitz 2008). Diese Tatsache macht die Pe vermutlich auch unabhängig von jeglichem dopaminergen Einfluss. Dennoch steht diese Theorie im Widerspruch zu der Annahme, dass Pe die bewusste Fehlerwahrnehmung im Rahmen der eigenen Handlungskontrolle

verkörpert, eine exekutive Fähigkeit, die erwiesenermaßen erst mit zunehmendem Alter ausreift (Moser et al. 2011). Zu ergänzen ist auch, dass Pe in Zusammenhang mit dem Phänomen des *post-error-slowing* gebracht wird, welches als ein Zeichen adaptiven Verhaltens nach einem Fehler gesehen wird und mit einem Lernprozess zur Verbesserung der eigenen Leistung assoziiert wird (Gehring und Fencsik 2001). Diese Annahme impliziert eine Zunahme der Pe im Altersverlauf, welche in einer Studie von Grammer et al. (2014) nachgewiesen werden konnte.

1.6 Entwicklung der Fragestellung und Hypothesen

Die aktuelle Literatur zum Priming liefert wichtige Informationen zur generellen Entstehung und Entwicklung des Phänomens. Es existieren jedoch wenige konkrete Ergebnisse zu den Unterschieden des Priming-Effekts bei Kindern und Erwachsenen, die aufgrund der Gehirnentwicklung und der Summe an Lebenssituationen, die dabei modifizierend Einfluss nehmen, zu erwarten sind. In der vorliegenden Arbeit soll diese Forschungslücke geschlossen werden. Hierbei konzentriert sich die Untersuchung auf die Unterschiede im Fehlerverhalten von Erwachsenen und Kindern unter dem Einfluss verschiedener Faktoren wie z. B. Zeit- und Leistungsdruck. Anhand der EEG-Aufzeichnungen, die während der Beantwortung einer modifizierten Eriksen Flanker Task gemacht wurden, kann man die zeitlichen Abläufe des Fehlverhaltens und der Fehlerverarbeitung beider Probandengruppen direkt miteinander vergleichen. Hierbei wurden mögliche altersbedingte Unterschiede der Amplituden und des lokalisierungsbezogenen Auftretens von Ne und Pe betrachtet. Ein weiterer wichtiger zu untersuchender Aspekt war der Einfluss der Bedingungen Kongruenz/Inkongruenz oder Antwortwiederholung/Antwortwechsel auf das Fehlerverhalten sowie auf die Variabilität der Reaktionszeiten beider Gruppen. In vorherigen Studien konnte bereits belegt werden, dass Kinder aufgrund ihres Entwicklungsstands langsamer reagieren und mehr Fehler machen als Erwachsene (Davies et al. 2004; Wendelken et al. 2011). Vor allem bei inkongruenten Trials konnten bei Kindern signifikant längere Reaktionszeiten und höhere Fehleranzahlen gemessen werden (Davies et al. 2004). Bislang ist jedoch wenig darüber bekannt, inwiefern der Entwicklungsprozess auch

einen Einfluss auf die Entwicklung und die Ausprägung des Priming-Effekts hat. Die bisher sehr heterogene Ergebnislage vorhergehender Studien reicht von einem vollständig ausbleibenden Priming-Effekt bei Kindern (Tipper et al. 1989) bis hin zum unterschiedslosen Auftreten des Effekts bei Kindern und Erwachsenen (Frings et al. 2007a).

Darüber hinaus konnte bereits gezeigt werden, dass das Alter der Probanden die Ausprägung der Ereignis-korrelierten Potenziale der Fehlererkennung Ne und Pe während der Aufgabenbearbeitung beeinträchtigt. Die Ergebnisse vorhergehender Studien zeigten entweder eine deutlich stärker ausgeprägte Ne bei Erwachsenen als bei Kindern, wofür ein Entwicklungseffekt mit steigenden Ne-Amplituden mit zunehmendem Alter vermutet wurde (Davies et al. 2004; Santesso und Segalowitz 2008), oder aber wiesen keinerlei Unterschiede bei Erwachsenen und Kindern auf (Richardson et al. 2011). Die Pe hingegen gilt bislang als ein altersunabhängiger Faktor und konnte bei Kindern und Erwachsenen gleichermaßen vorgefunden werden (Davies et al. 2004; Wiersema et al. 2007; Santesso und Segalowitz 2008).

In Anbetracht der bereits vorhandenen Literatur und der aktuellen Forschungsergebnisse in den Bereichen Neurophysiologie, Anatomie und Psychologie ließen sich folgende Hypothesen zu dieser Studie aufstellen:

1.6.1 Verhaltensdaten: Fehleranzahl und Reaktionszeit

- I. Kinder machen generell mehr Fehler als Erwachsene und weisen generell langsamere Reaktionszeiten auf.
- II. Die Reaktionszeitvariabilität ist bei den Kindern größer als bei den Erwachsenen.
- III. Bei kongruenten Trials werden generell weniger Fehler gemacht als bei inkongruenten Trials und die Reaktionszeit fällt kürzer aus.
- IV. Die Kongruenz des Prime-Trials hat einen Einfluss auf die Reaktionszeit des folgenden Probe-Trials.

1.6.2 EEG-Daten: Ereignis-korrelierte Potenzialen Ne und Pe

- V. Die Amplitude der Ne fällt bei den Kindern generell niedriger aus als bei den Erwachsenen.
- VI. Die durchschnittlichen maximalen Amplituden von Ne können bei den Erwachsenen nach einem Fehler an der fronto-zentralen Elektrode FCz innerhalb eines Zeitfensters von ca. 80 - 150 ms gemessen werden, während sie bei den Kindern weiter posterior mit einer höheren Latenzzeit vorzufinden sind.
- VII. Die Amplitude der Pe unterscheidet sich nicht signifikant in den beiden Altersgruppen.
- VIII. Die durchschnittlichen maximalen Amplituden von Pe können bei beiden Gruppen an einer zentro-parietalen Elektrode in einem Zeitfenster von 200 - 500 ms nachgewiesen werden.

1.6.3 Hypothesen zum Priming

- IX. Wird in einem Probe-Trial eine Antwortwiederholung gefordert (RR), bei der die Probe-Target-Reaktion mit der des Prime-Targets übereinstimmt, werden generell weniger Fehler gemacht und geringere Reaktionszeiten benötigt als wenn ein Antwortwechsel (RC) gefordert wird.
- X. Wird in einem Probe-Trial eine Antwortwiederholung gefordert (RR), fällt die Ne generell größer aus als wenn ein Antwortwechsel gefordert wird (RC).
- XI. Wird in einem Probe-Trial eine Antwortwiederholung gefordert (RR), fällt die Pe generell größer aus als wenn ein Antwortwechsel gefordert wird (RC).
- XII. Ein negativer Priming-Effekt tritt auf, sobald ein Prime-Distraktor im Probe als Target wiederholt wird (Distraktor-zu-Target-Bedingung).
- XIII. Kinder und Erwachsenen weisen keinen signifikant unterschiedlichen negativen Priming-Effekt auf.

2 Material und Methode

2.1 Studiendesign

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine randomisierte experimentelle Studie, bei der zwei Gruppen querschnittsmäßig untersucht wurden. Entsprechende Genehmigungen für die Durchführung der Studie sowie für den anonymisierten Zugriff auf die erhobenen Probanden-Daten wurden von der Ethikkommission eingeholt. Die Antrag-Nummern sind 22-11-03 (Kinder), 20-6-11 (Erwachsene) und 17-5-07 (ADHS-Kinder). Für die Erhebung der aktuellen Datensätze wurde lediglich auf die bereits vorhandenen Daten zurückgegriffen, welche unter den Aspekten dieses Studiendesigns neu ausgewertet wurden.

2.1.1 Stichprobe

Zwei gesunde Probandengruppen zweier verschiedener Altersgruppen aus Göttingen und Umgebung wurden unter gleichen Bedingungen mit einem modifizierten Eriksen Flanker Task konfrontiert. An der Untersuchung nahm eine Gesamtanzahl von $n = 157$ Probanden, davon 89 Kinder und Jugendliche und 68 Erwachsene, teil. Die Daten aller Teilnehmer wurden vor der Auswertung pseudonymisiert.

2.1.2 Ein- und Ausschluss-Kriterien

Für die Studienteilnahme galten folgende Einschlusskriterien: Die Kinder mussten in einem Altersbereich von acht bis fünfzehn Jahren sein, die Erwachsenen sollten zwischen zwanzig bis zweiunddreißig Jahren alt sein. Generell durften keine wesentlichen psychischen und physischen Vorerkrankungen vorliegen. Auch eine psychische Erkrankung eines nahen Verwandten schloss die Studienteilnahme aus. Alle Probanden sollten über ein gesundes Sehvermögen verfügen oder trugen eine Brille, welche eine optimale Sehleistung gewährleistete. Bei beiden Gruppen wurde ein IQ nach Sattler (1992) von mindestens 80 vorausgesetzt, welcher bei der

Kindergruppe anhand eines zuvor durchgeführten Tests ermittelt und bei den Studenten als gegeben vorausgesetzt wurde. Beide Probandengruppen mussten erfolgreich an der EEG-Untersuchung teilgenommen haben. Teilnahmevoraussetzend war für die Minderjährigen zudem eine von den Erziehungsberechtigten unterschriebene Einverständniserklärung nach einer ausführlichen Aufklärung über den Studienablauf.

2.1.3 Voraussetzungen zur statistischen Auswertung

In die Auswertung der Studie gingen von den 157 Teilnehmern nur die Probanden ein, die während des Eriksen Flanker Tests folgende Kriterien erfüllten: für alle Teilnehmer mussten ein auswertbares EEG zur Verfügung stehen und es musste eine Mindestanzahl von 8 Sweeps (EEG-Abschnitten) bei der Aufgabenbearbeitung erreicht werden. Es wurden nur fehlerhafte Trials verwendet, die auf einen korrekt beantworteten Trial folgten (prev. resp. correct). Es konnte gezeigt werden, dass eine Mindestanzahl von 6 bis 8 Fehler-Trials die Voraussetzungen für eine stabile Darstellung der Ne bei Kindern und Erwachsenen erfüllen (Pontifex et al. 2010). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde die Mindest-Sweepanzahl dieser Studie festgelegt und ermittelt. Zur Ermittlung der Sweeps wurde der Einfluss der Faktoren Alter, Antwortwiederholung und Antwortwechsel und Kongruenz auf die Anzahl der durchschnittlich erzielten Sweepanzahlen beider Probandengruppen unter den einzelnen Bedingungen SCC, SIC und SII mittels der Varianzanalyse (Analysis of Variance, ANOVA) getestet. Durchschnittlich erreichten die Erwachsenen mit 51 Sweeps signifikant mehr Sweeps als die Kinder mit einem Mittelwert von 46 Sweeps [$F_{(1; 97)} = 6,34$; $p = 0,01$; $\text{part } \eta^2 = 0,06$]. Ihre Quantität wurde bei beiden Gruppen deutlich vom Priming-Effekt beeinflusst [$F_{(1; 97)} = 18,23$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,16$]. Bei der Bedingung RC wurden im Schnitt 50, bei RR nur 47 Sweeps gezählt. Auch die Bedingungen SCC, SIC und SII führten altersabhängig zu signifikanten Unterschieden der Sweep-Anzahl [$F_{(2; 194)} = 690,85$; $\epsilon = 0,65$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,9$]. Generell wurden die meisten Sweeps bei SCC gezählt, gefolgt von SIC und SII. Die Variationen RR/RC-SCI konnten nicht in die Auswertung einbezogen werden, da unter diesen Bedingungen die Mindestanzahl von 8 geforderten Sweeps nicht erreicht wurde.

Generell gab es deutlich mehr Sweeps bei richtig beantworteten als bei fehlerhaften Trials. Bei den Bedingungen RR-SCC und RC-SCC wurden insgesamt am meisten Trials richtig beantwortet (siehe Abb. 5 und Tab. 1).

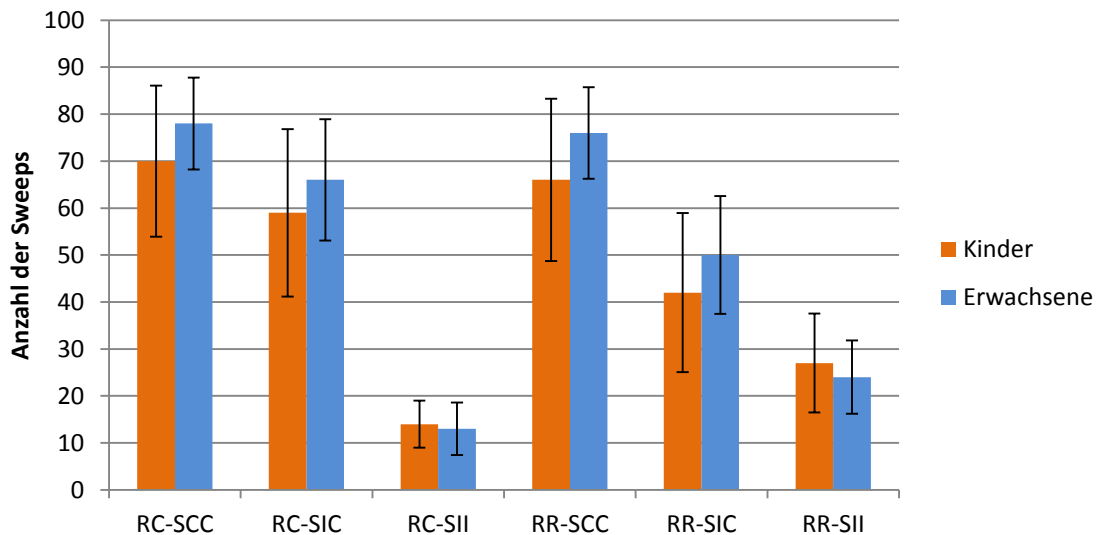


Abb. 5: Durchschnittliche Anzahl der Sweeps in den Probandengruppen.

Vergleich durchschnittlichen Sweep-Anzahl von Kindern und Erwachsenen unter den einzelnen Bedingungen mit Angabe der SD. Die Kinder erreichten generell weniger Sweeps als die Erwachsenen. Die meisten Sweeps wurden unter der Bedingung RC-SCC erzielt.

2.1.4 Eriksen Flanker-Aufgabe

Den Versuchspersonen werden bei der Eriksen Flanker-Aufgabe mehrere Stimuli in Form von Buchstaben (Eriksen und Eriksen 1974) oder Pfeilen, die in unterschiedliche Richtungen weisen (Eriksen und Schultz 1979), präsentiert. Es gilt dabei, ein Zielstimulus (Target) von einem, meist aber von mehreren Distraktoren (Flankern) zu differenzieren. Der Proband hat die Anweisung sich auf das Target zu konzentrieren ohne sich von den Distraktoren ablenken zu lassen. Anhand der im Test gemachten Fehler können Ereignis-korrelierte Potenziale über ein EEG gemessen und aufgezeichnet werden. Diese dienen der Auswertung des Fehlerverhaltens.

2.2 Prozedur

Die neurophysiologische Untersuchung fand in einem schallgeschützten, abgedunkelten Raum der Kinder- und Jugendpsychiatrie der Universität Göttingen statt. Die gesamte Vorbereitungszeit für den Test betrug bei den Kindern ca. 10 min, bei der älteren Kontrollgruppe aufgrund der höheren Elektrodenzahl ca. 30 min. Alle Teilnehmer absolvierten unter der Aufsicht eines Studienleiters einen modifizierten Eriksen Flanker Task (Eriksen und Eriksen 1974). Die Stimuli waren gleichseitige Dreiecke, welche auf einem hellgrauen Hintergrund dargeboten wurden. Diese wurden mit einem einheitlichen Sehwinkel von $0,8^\circ$ pro Dreieck und 3° pro Pfeilblock á 3 Pfeilen betrachtet. Den Kindern wurden die Stimuli mittig über einem 17" CRT Monitor der Firma Iiyama, den Erwachsenen über einen TFT- Bildschirm präsentiert. Der CRT-Monitor der Kindergruppe wies keine Latenzzeit auf, während für den TFT-Monitor eine Latenzzeit von 10 ms korrigiert wurde. Dazu wurde die Software Präsentation Version 9.9 der Firma Neurobehavioral Systems benutzt. Vorab erhielt jeder Teilnehmer sowohl eine mündliche Anleitung von einem Betreuer als auch eine schriftliche Instruktion, welche auf dem Monitor kurz vor dem Start der Probetrials präsentiert wurde. Jeder Trial begann mit dem Erscheinen eines zentral platzierten Kreuzes als Startsignal, welches darauf folgend durch die Stimuli ersetzt wurde. 100 ms vor dem Einblenden des Targets erschienen die äußeren Flanker (zwei dreieckige Pfeile, dessen Spitze in dieselbe Richtung zeigten, entweder nach rechts oder nach links), gefolgt von der Präsentation des eigentlichen mittleren Zielpfeils für weitere 150 ms (siehe Abb. 6). Das Vorkommen aller Gegebenheiten wurde randomisiert und war für alle Bedingungen gleich wahrscheinlich. Alle 1650 ms wurde ein neuer Trial gezeigt. Die Dauer der gesamten Aufgabe mit 400 Trials betrug ca. 13 min. Der Test umfasste 10 Blöcke à 40 Aufgaben.

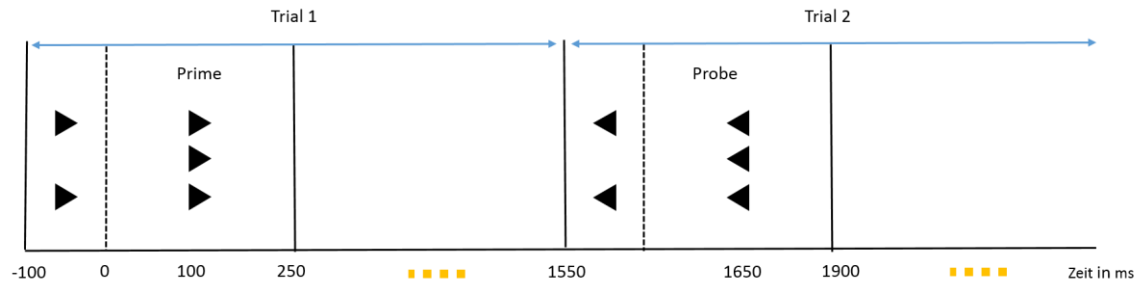


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des Eriksen Flanker Task

Zunächst erscheinen die äußeren Flanker, 100 ms später wird das (kongruente oder inkongruente) Target für weitere 250 ms eingeblendet. Alle 1650 ms erscheint ein neuer Trial.

Die Probanden mussten entweder die linke oder die rechte Maustaste entsprechend der angezeigten Richtung des mittleren Zielpfeils drücken. Bei den Kindern wurde hierbei eine serielle Logitech-Maus verwendet, die eine Antwort-Trigger Verzögerung von 36 ms verursachte. Bei den Erwachsenen wurde eine Razer Salmosa Gaming-Maus mit einer Verzögerungszeit von 4 ms benutzt. Die Latenzzeiten wurden für beide Mäuse nachfolgend korrigiert. Die Aufgabe variierte in den Faktoren Richtung (Target zeigt nach links oder rechts) und Kongruenz. Bei kgr. Trials stimmte die Richtung der Flanker mit der des Targets überein. Bei ikgr. Trials zeigten Flanker und Target in entgegengesetzte Richtungen. Entweder wiederholte sich ein Trial und damit auch die Antwort, oder aber die Bedingung wechselte von einem auf den nächsten Trial und ein Antwortwechsel wurde gefordert. Somit ergeben sich sechs verschiedene Darbietungsmöglichkeiten der Aufgabe (siehe Abb. 7):

Stimulus-bezogen:

- links/rechts kongruent (alle drei Pfeilspitzen, sowohl Flanker als auch Target, zeigen nach links oder rechts): SCC (Stimulus kongruent korrekt)
- links/rechts inkongruent (Target zeigt nach links, Flanker zeigen nach rechts oder umgekehrt): SIC (Stimulus inkongruent korrekt) und SIC (Stimulus inkongruent inkorrekt)

Response-Priming:

- Antwort-Wiederholung (*response repetition*; RR)
- Antwort-Wechsel (*response change*; RC)

Leistungs-bezogen :

- Die gegebene Antwort ist korrekt
- Die gegebene Antwort ist inkorrekt

Zudem muss der Faktor Kongruenz als Sequenz-Effekt (Gratton-Effekt) bei zwei aufeinanderfolgenden Trials, also einem Prime und seinem jeweiligen Probe, differenziert werden. Somit ergeben sich 4 weitere Bedingungsmöglichkeiten (siehe Abb. 8):

- Kongruenz des Primes und Kongruenz des jeweiligen Probes (CC)
- Kongruenz des Primes und Inkongruenz des jeweiligen Probes (CI)
- Inkongruenz des Primes und Inkongruenz des jeweiligen Probes (II)
- Inkongruenz des Primes und Kongruenz des jeweiligen Probes (IC)

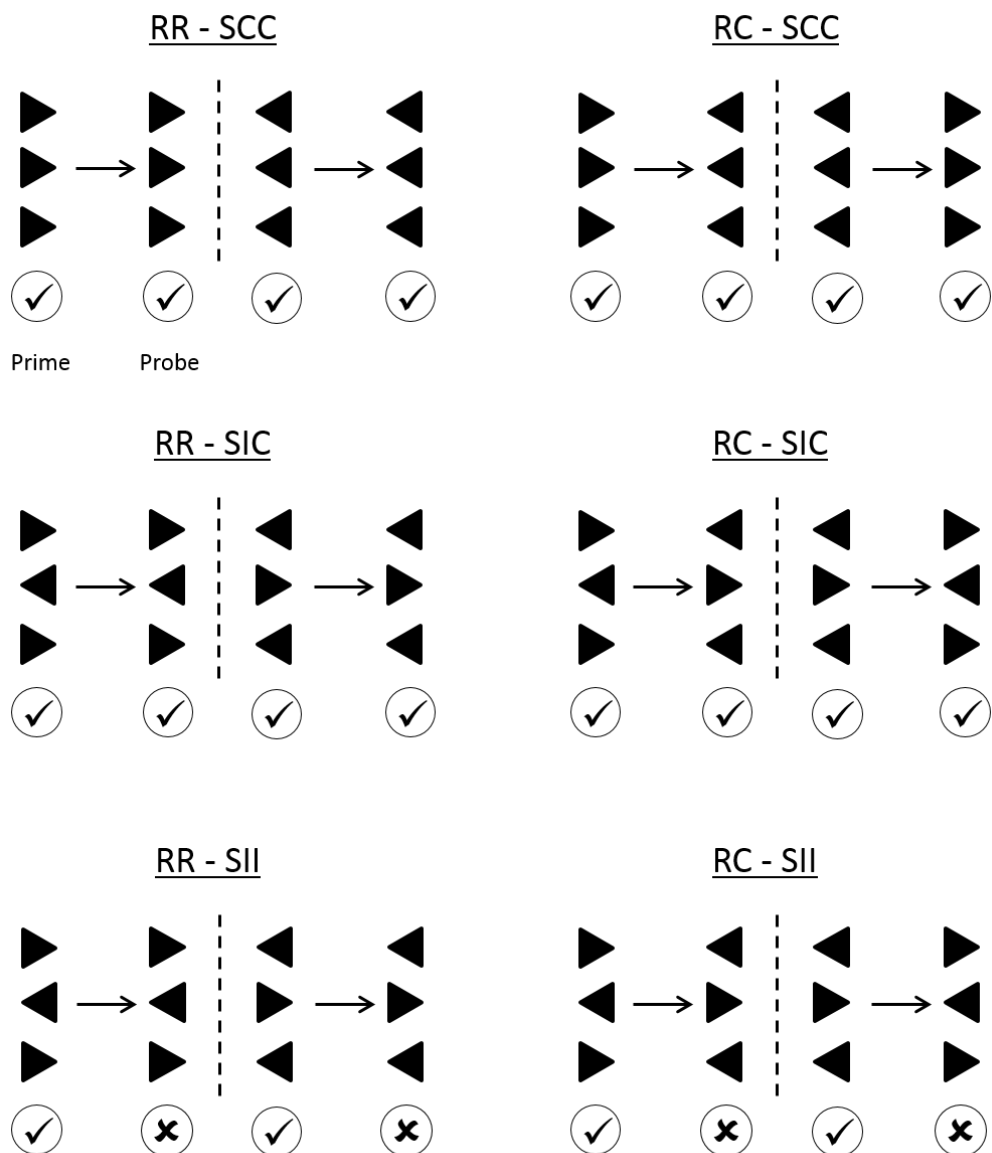


Abb. 7: Darstellung aller im Flanker Task vorkommenden Bedingungen unter Berücksichtigung der Kongruenz, einer RR oder RC und der Leistung des Probanden im Sinne einer Richtig- oder Falschantwort.

Die einzelnen Bedingungen werden jeweils nach rechts oder links zeigend dargestellt. Der erste Trial ist jeweils der Prime-Trial, der zweite der Probe. Die Häkchen stehen für einen richtig beantworteten Trial. Die Kreuze implizieren die Falschbeantwortung eines Probes. In dem Fall hat der Proband die gegenteilige Antwort abgegeben als sie in der Bedingung dargestellt wird.

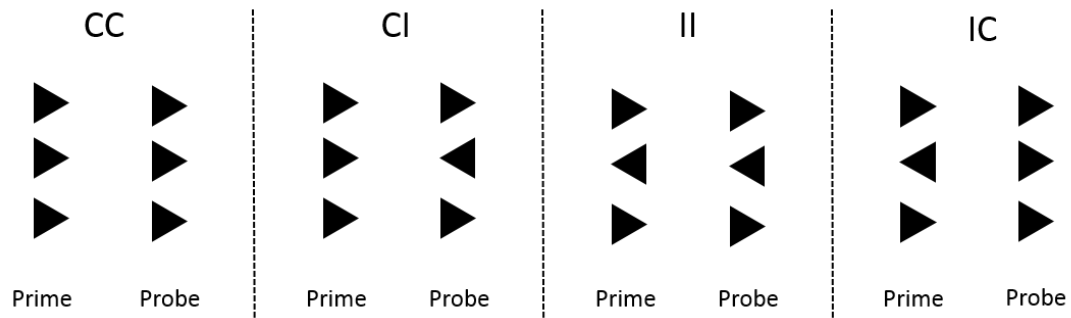


Abb. 8: Darstellung der Bedingungskombinationen im Eriksen Flanker Task bezogen auf die Kongruenz zweier aufeinanderfolgender Trials.

Der erste Trial ist jeweils der Probe, sein entsprechend folgender Trial der Probe. Bei der Bedingung CC liegt sowohl im Prime als auch im Probe eine Kongruenz vor, bei II sind beide Trials inkongruent. Bei CI ist der Prime kgr. und der Probe ikgr., bei IC tritt der umgekehrte Fall ein. Alle Bedingungen können jeweils nach rechts oder links zeigen.

Die Abfolge der einzelnen Trials war in jedem Block eines Probanden dieselbe, variierte aber für jeden Probanden. Vor dem Start der eigentlichen Aufgabe mussten die Probanden zwei Blöcke à 12 Probetrials absolvieren, um ein Grundverständnis für die Art der Aufgabe zu entwickeln. Auch ein Ruhe-EEG von jeweils 3 min Dauer mit geöffneten und mit geschlossenen Augen wurde vorab aufgezeichnet. Dem Ruhe-EEG folgte ein *Continuous Performance Test*, mit dem die exekutiven Funktionen, besonders die selektive Aufmerksamkeit der Probanden getestet werden. Ziel der Flanker-Aufgabe war es, möglichst viele Fehler zu provozieren, um eine aussagekräftige Anzahl an ERPs aufzeichnen und auswerten zu können.

2.2.1 Feedback

Zwischen jedem Block erhielt der Proband für 8 sec. zu seinem Leistungsergebnis ein entsprechendes schriftliches Feedback:

- Wenn ein Proband die kgr. Trials eines Blocks mit einer Fehlerfreiheit von $\geq 90\%$ beantwortete, seine Fehlerquote bei ikgr. Trials zwischen 10-40 % lag und sein Ergebnis bei kgr. Trials mindestens 10 % besser als war bei den ikgr. Trials, so erhielt er das visuelle Feedback: „Super, mach genauso weiter“.
- Wenn ein Proband bei kgr. Trials eine Fehlerrate von über 10 % hatte und mehr als 40 % Fehler bei ikgr. Trials machte, so erschien das Feedback: „Gut, aber bitte noch etwas genauer!“.
- Wenn ein Proband sowohl kgr. als auch ikgr. Trials mit einer Fehlerfreiheit von über 90 % lösen konnte, so erhielt er das Feedback: „Gut, aber bitte noch etwas“.

schneller!“. Der größere Zeitdruck sollte in diesem Fall zu einer höheren Fehlerrate führen.

- Unter allen anderen Bedingungen erschien das Feedback: „Gut!“.

Die Feedbacks sollten den Probanden die Möglichkeit geben, ihr Fehlerverhalten zu kontrollieren und zu verbessern. Dass sie einen Einfluss auf die Fehlerverarbeitung haben, konnte bereits gezeigt werden (Segalowitz und Dywan 2009; Falkenstein et al. 2000; Hajcak 2012). Außerdem sollte damit die Aufmerksamkeit der Kinder aufrechterhalten werden. Alle Probanden wurden aufgefordert, die Aufgaben so schnell wie möglich und möglichst fehlerfrei zu beantworten.

2.2.2 EEG

Bei den Kindern wurde ein 27-Kanal-Elektroenzephalogramm nach einem erweiterten 10-20-Elektrodenystem nach Jasper (1958), bei den Erwachsenen nach einem 10-10-System mit Silber/ Silberchlorid (Ag/AgCl) Ring-Elektroden aufgenommen. Alle EEG-Ableitungen wurden nach festgelegten standardisierten Methoden bearbeitet (Picton et al. 2000). Die Elektroden wurden über EEG-Elektrodenkappen Modell „easy caps“ verschiedener Größen auf den entsprechenden Kopfhautstellen befestigt. Die Kopfhaut wurde mit Äthylalkohol (70 %) gereinigt und mit einer abrasiven Elektrodenpaste (Abralyt 2000) bearbeitet, um die Impedanz zwischen Elektrode und Kopfhaut zu minimieren. Die Impedanz wurde unter 10 k Ω gehalten, um eine möglichst artefaktfreie Aufzeichnung zu gewährleisten (Picton et al. 2000). Für diese Studie wurden die gemessenen Werte an den Elektroden Fz, FCz, Cz und Pz analysiert. Gleichzeitig wurde ein vertikales und horizontales Elektroofokulogramm (EOG) aufgenommen, wozu jeweils eine Elektrode oberhalb und unterhalb des rechten Auges und eine an den äußeren Lidwinkeln platziert wurden. FCz galt sowohl für das EEG als auch für das EOG als Referenzelektrode und lag zwischen Fz und Cz. Die Ground-Elektrode zur Erdung wurde auf der Stirn zwischen FCz und Fz platziert. Der Mittelwert aller Elektroden wurde als Referenzwert bestimmt. Die Messung der Average-Reference ergab folglich 0 μ V (Luck 2005). Das Signal wurde mit einem BrainAmp Standard-Verstärker der Firma Brain Products GmbH verstärkt. Die Daten wurden mit einer Sampling-

Rate (Abtastrate) von 500 Hz mit einem „low-cutoff-Filter“, eingestellt auf 0.016 Hz, und einem „high-cutoff-Filter“ mit 100 Hz, sowie mit einem Kerbfilter eingestellt auf 50 Hz aufgenommen. Aufgezeichnet wurden die Daten mit der Brain Records Software Version 1.2. Danach folgte über den Formular Elevator die Umreferenzierung auf den Mittelwert (average reference), wobei der Mittelwert aller Elektroden mit der Referenzelektrode summiert wird und gleich Null gesetzt wird. Es folgte eine erneute Filterung der Daten mit einem „low-cut-off-Filter“ eingestellt auf 0,1 Hz und einem „high-cut-off-Filter“ bei 15 Hz (24 db/oct Butterworth Zero Phase Filter). Mögliche Augenartefakte wurden nach der Methode von Gratton et al. (1983) korrigiert und entfernt. Daraufhin wurden noch mit Artefakten behaftete EEG-Abschnitte anhand des „Raw-Data-Inspectors“ erneut ermittelt und von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen. Durch diese Art der Datenverarbeitung konnte die Gewinnung möglichst artefaktfreier Datensätze gewährleistet werden. Die Ereignis-korrelierten Potenziale dieser Studie konnten bei einer Frequenz von ca. 10 Hz gemessen werden. Lag die Amplitude einer beliebigen Elektrode bei über $\pm 100 \mu\text{V}$ und befand sich diese in einem Zeitabschnitt von -150 bis +800 ms, so wurde dieser Teil aus der Analyse ausgeschlossen. Für die Bedingung prev. resp. correct wurde für die antwortbezogenen ERPs eine Tastendruck-Zeitspanne gewählt, die die Betrachtung des exakten Zeitabschnittes nach Eingabe einer korrekten Antwort gewährleistet. Wurde eine Antwort schneller als 150 ms oder langsamer als 1500 ms abgegeben, so wurde sie nicht in die Auswertung eingeschlossen. Um die im Vergleich zur zerebralen Grundaktivität niedrig-amplitudigeren ERP-Signale messbar machen zu können, musste sowohl eine erneute Mittelung aller ERP-Signale aus allen Ableitungen als auch die Subtraktion der zerebralen Grundaktivität sowie des Rauschens erfolgen. Der Vorgang des sog. Averaging ist vor der Quantifizierung der ERPs ein wichtiger Prozess um eine sichere Darstellung der restlichen Aktivität zu gewährleisten. Das so entstandene Segment beinhaltet letztendlich eine stabile Beziehung zwischen der Zeit und dem Ereignis und liefert somit das gewünschte ERP (Albrecht 2009).

2.2.3 Statistische Auswertung der Daten

Zur weiteren Auswertung wurde die Statistik und Analyse Software SPSS Version 21 (Statistical Package for the Social Science) sowie das Software-Programm Brain Analyser Version 2.0 verwendet. Die zuvor erhobenen Datensätze (Alter in Monaten, Geschlecht, HAWIK-IQ der Kinder, EEG-Aufzeichnung, Fehlerrate, Reaktionszeit und Art der Fehler) wurden mit den Programmen verknüpft und mithilfe der Varianzanalyse statistisch ausgewertet. Bei den Verhaltensdaten wurden die Fehleranzahl, die Reaktionszeiten und die Reaktionszeitvariabilität (RT-V) sowie möglichen Innersubjekteffekte anhand von Varianzanalysen mit Messwiederholungen (ANOVA) ermittelt. Die Fehleranzahlen und die RT-V wurden nach der klassischen Flanker Task-Auswertung zwischen kongruenten und inkongruenten Items ohne Berücksichtigung von Sequenzeffekten verglichen und auf Unterschiede bei beiden Altersgruppen getestet. Die Analyse der Reaktionszeiten beinhaltete die drei Faktoren prev. congruency (Kongruenz oder Inkongruenz des Prime-Trials), prev. resp. (RR oder RC zwischen Prime und Probe) und congruency (Kongruenz oder Inkongruenz des Probe-Trials). Bei der Analyse der EEG-Daten wurden die Faktoren Elektrode (Ne: Fz, FCz und Cz; Pe: Cz und Pz), repetition (RR oder RC) und resp. type (korrekte oder fehlerhafte Antwort) auf die gemittelten Amplituden (averages) von Ne und Pe untersucht und auf Unterschiede bei beiden Altersgruppen getestet. Bei den Error-Processing-Daten wurden die Grand Averages der größten fehlerspezifischen Ne- und Pe-Peaks beider Gruppen analysiert. Somit konnten die Zeitfenster für die Maxima beider Potenziale ermittelt werden. Die Inspektion der Gruppen-Grand-Averages ergab für die Ne der Erwachsenen einen durchschnittlichen Bereich von -25 bis +90 ms nach Antwortabgabe an den frontozentralen Elektroden FZ, FCz und Cz, welcher in die Bewertung einbezogen wurde. Bei der Kindergruppe wurde für die Ne ein Bereich von +10 bis +125 ms festgelegt. Für die Pe wurde bei beiden Probandengruppen ein Zeitfenster von +100 bis +400 ms nach der Antwortabgabe mit einem zentro-parietalen Maximum an den Elektroden Cz und Pz bewertet. Um jedoch die Fehlerspezifische Ne und Pe darstellen zu können, werden die Datensätze des Ne- und Pe-Enhancements angegeben, welche aus der Differenz von RC-SII und RC-SIC sowie RR-SII und RR-SIC

berechnet werden. Um bei den Resultaten der ANOVA mit Messwiederholung eine Verletzungen der Sphärizität zu vermeiden, wurden gegebenenfalls der Greenhouse-Geisser ϵ -Korrekturfaktor und angepasste p-Werte in Verbindung mit den originalen Freiheitsgraden angegeben. Aufgrund der großen heterogenen Varianz der Standardabweichung innerhalb der Kindergruppe musste die Zuverlässigkeit und Aussagekraft des t-Tests bei der Varianzanalyse angezweifelt werden. Die Entwicklungseffekte der Kinder führten dazu, dass ihre Standardabweichungen durchschnittlich doppelt so groß waren wie die der Erwachsenen. Zudem muss beachtet werden, dass die Gruppen ungleiche Teilnehmerzahlen besitzen. In der Kindergruppe befinden sich fast doppelt so viele Probanden wie in der Erwachsenengruppe (~2/1). Um den Einfluss dieser Gruppen-Inhomogenität auf die Ergebnisse der Verhaltens- und EEG-Daten zu reduzieren, wurde das Signifikanzniveau bei den Innersubjektanalysen (Age Group-Effekte) bei der Testung der altersabhängigen Konkordanz-, Priming- und Kongruenz-Effekte nach der Methode von Ramsey (1980) von 0,05 auf 0,01 angehoben.

3 Ergebnisse

3.1 Statistische Beschreibung der Gruppen

Insgesamt nahmen $n = 157$ Probanden (Erwachsene, $n = 68$; Kinder, $n = 89$) an der Studie teil. Aufgrund einer erhöhten Anzahl von Artefakten im EEG oder extremen Bearbeitungsstrategien der Aufgabe, welche beispielsweise eine zu geringe Fehleranzahl erbrachten, konnten Datensätze von insgesamt $n = 58$ teilnehmenden Probanden nicht berücksichtigt werden. Die Ausschussrate (Dropout Rate) ist ein Maß für die relative Anzahl aller Teilnehmer, die aufgrund der festgelegten Einschlusskriterien nicht bei der Auswertung berücksichtigt werden konnten. Von den $n = 58$ Dropouts waren $n = 28$ aus der Kindergruppe und $n = 30$ aus der Erwachsenenengruppe. Insgesamt konnten Datensätze von $n = 99$ Probanden analysiert werden (Erwachsene, $n = 38$; Kinder, $n = 61$) (Abb. 9 und Abb. 10).

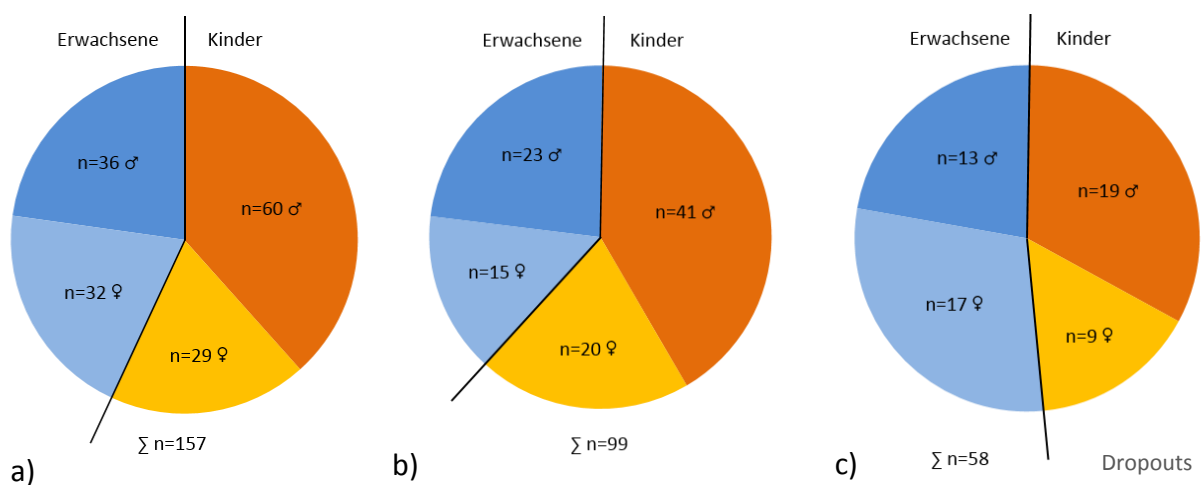


Abb. 9: Geschlechterverteilung der Gruppen in der Stichprobe.

a) Tortendiagramm aller Teilnehmer, die die Einschlusskriterien erfüllten. b) Tortendiagramm aller Teilnehmer, die die Kriterien zur Teilnahme an der statistischen Auswertung erfüllten. Das Verhältnis von weiblichen zu männlichen Probanden ist deutlich zugunsten der Männer verschoben. c) Tortendiagramm der ausgeschlossenen Teilnehmer (Dropouts).

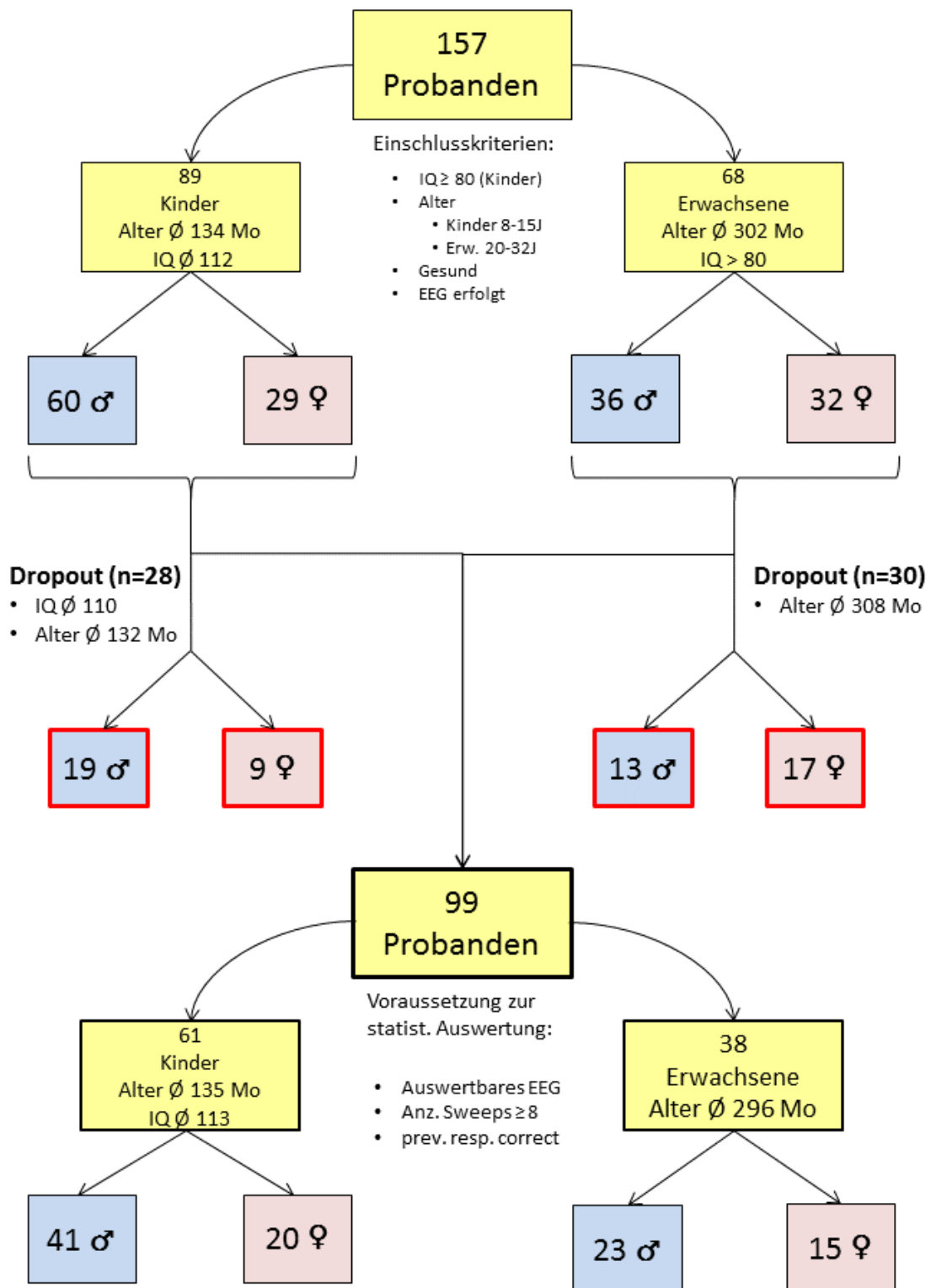


Abb. 10: Flussdiagramm zur Illustration der Probandenrekrutierung.

Insgesamt nahmen $n=157$ Probanden an der Studie teil, die die Einschluss-Kriterien erfüllten. Nach Berücksichtigung der Analyse-kriterien verringerte sich die Probandenanzahl auf $n=99$ (Erwachsene $n=38$; Kinder $n=61$). Am Flussdiagramm lassen sich die Dropout-Rate, die Geschlechterverteilung, das durchschnittliche Alter in Monaten sowie der durchschnittliche IQ der Kinder ablesen. Bei den Erwachsenen wurde von einem entsprechenden IQ > 80 ausgegangen, da es sich ausschließlich um Studenten handelte.

Das Durchschnittsalter der Probanden wurde nach Betrachtung des jeweiligen Testdatums gerundet auf volle Monate berechnet. Das durchschnittliche Alter aller Kinder und Jugendlichen, die an der Studie teilnahmen ($n=89$), lag bei 134 Monaten (~11 Jahren), das der Erwachsenen ($n=68$) bei 302 Monaten (~25 Jahren). Nach Berücksichtigung der Analyse Kriterien lag das durchschnittliche Alter aller in die Studie eingeschlossener Kinder und Jugendlichen ($n=61$) zum Testzeitpunkt bei 135 Monaten (~11 Jahren). Die Erwachsenen ($n=38$) waren im Mittel 296 Monate (~25 Jahre) alt. Wie das Ergebnis des Chi-Quadrat-Tests zeigte ($\chi^2_{(1)}=2,7$; $p=0,10$), war das Dropout-Verhältnis beider Gruppen annähernd gleich.

Die Verteilung der Geschlechter innerhalb der beiden Probandengruppen war homogen ($\chi^2_{(1)}=0,5$, $p=0,50$). Von den $n=99$ eingeschlossenen Probanden waren $n=64$ männlich und $n=35$ weiblichen Geschlechts. Beide Geschlechter zeigten eine annähernd gleich hohe Dropout-Rate (♂ $n=32$ vs. ♀ $n=26$). Im Trend zeigte sich, dass sich das Geschlechterverhältnis nach Selektion des Kollektivs anhand der Analyse Kriterien zugunsten der männlichen Probanden verschob ($n=93♂/n=61♀$ vs. $n=64♂/n=35♀$) (siehe Abb. 9 und 10).

3.2 Verhaltensdaten

3.2.1 Fehlerrate

Zur Berechnung der Fehlerrate wurden bei der klassischen ANOVA die Interaktion der beiden Parameter Kongruenz und Alter untersucht. Die Fehlerrate wies signifikante Unterschiede bei den beiden Altersklassen auf [$F_{(1; 97)}=15,71$; $p<0,01$; part $\eta^2=0,14$]. Die Kinder zeigten eine durchschnittliche Fehlerrate von 17,1 %, die Fehlerrate der Erwachsenen lag bei 12,3 %. Betrachtet man die Interaktion des Kongruenz-Effekts mit der Fehlerrate, so wurden bei ikr. Trials deutlich mehr Fehler gemacht als bei kgr. Trials [$F_{(1; 97)}=492,85$; $p<0,05$; part $\eta^2=0,84$] (siehe Abb. 11). Es ergab sich kein signifikanter Unterschied des Effekts innerhalb der Altersgruppen [$F_{(1; 97)}=1,01$; $p=0,32$; part $\eta^2=0,01$], wobei er bei den Kindern tendenziell stärker auftrat als bei den Erwachsenen. Der Unterschied der Fehlerrate bei Kindern und Erwachsenen war bei ikr. Trials doppelt so hoch wie bei kgr. Trials (3% vs. 6%).

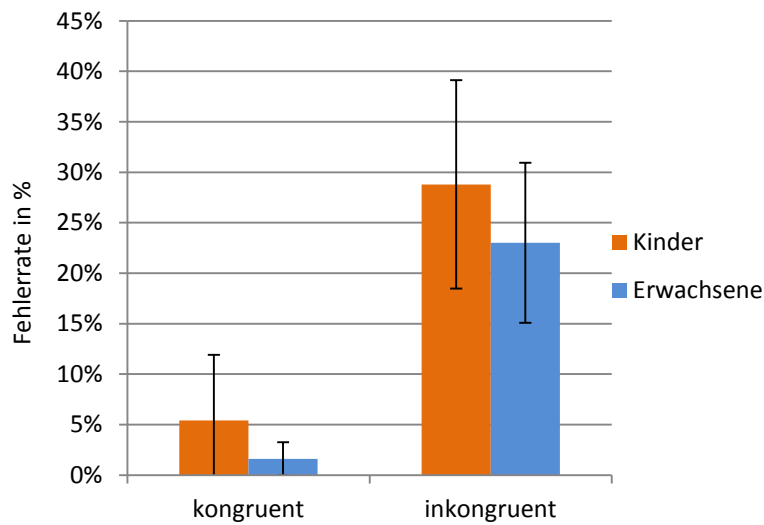


Abb. 11: Fehlerrate der Probanden bei kongruenten und inkongruenten Trials.

Vergleich der Fehlerrate von Kindern und Erwachsenen bei kongruenten und inkongruenten Trials mit Angabe der SD. Kinder machten generell mehr Fehler als Erwachsene. Bei inkongruenten Trials war die Fehlerrate deutlich höher als bei kongruenten Trials.

3.2.2 Reaktionszeit

Zur Berechnung der Reaktionszeiten wurden bei der ANOVA die Interaktion des Alters der Probanden mit verschiedenen Faktoren untersucht. Dazu gehörten die Kongruenz des vorangegangenen Trials, RR oder ein RC zwischen zwei aufeinanderfolgenden Trials, die Kongruenz des aktuellen Trials, die Kongruenz des vorangegangenen Trials in Verbindung mit einer geforderten RR oder einer RC und umgekehrt, die Bedingung RR oder RC zwischen zwei Trials mit der Kongruenz des aktuellen Trials. Die Abb. 12 gibt einen Überblick über die erzielten Reaktionszeiten beider Gruppen unter den Unterschiedlichen Bedingungen (Messwerte siehe Tab. 2 im Anhang). Die ermittelten durchschnittlichen RTs beider Probandengruppen bewegten sich in einem Bereich von ca. 300 bis ca. 500 ms.

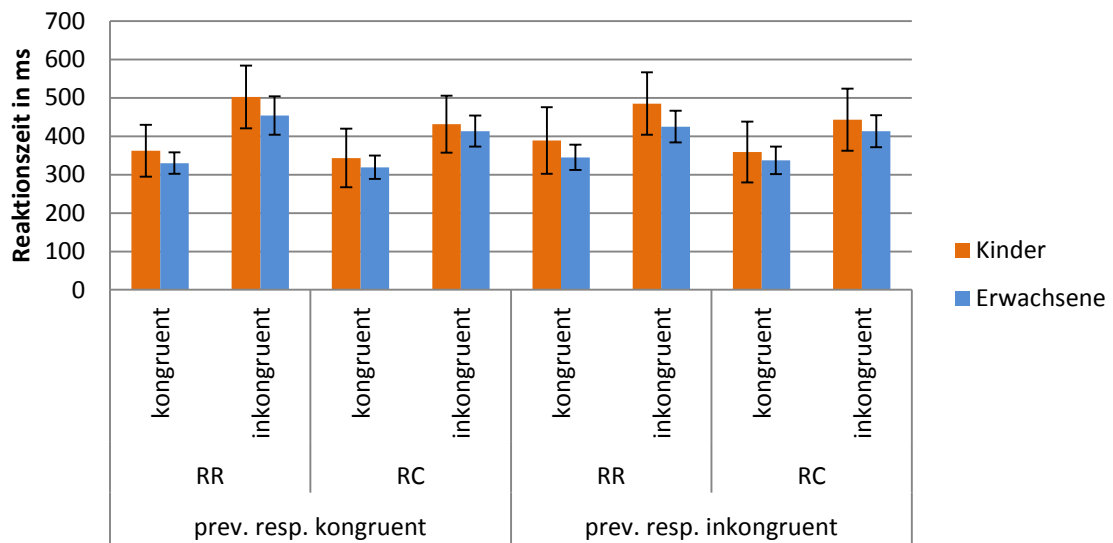


Abb. 12: Durchschnittliche Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen mit Unterscheidung der verschiedenen Bedingungen. Vergleich der Reaktionszeiten (RT) in ms der Kinder und Erwachsenen bezogen auf die Bedingungen Kongruenz/Inkongruenz des vorangehenden Prime-Trials, RR oder RC und Kongruenz oder Inkongruenz des Probe-Trials mit Angabe der SD. Generell erzielten die Erwachsenen schnellere RTs als die Kinder. Generell wurden schnellere RTs erzielt, wenn ein Antwortwechsel (RC) zwischen beiden Trials gefordert wurde und eine Kongruenz vorlag. Die schnellste RT wurde bei der Bedingung prev. resp. kgr.-RC-kgr., die langsamste bei prev. resp. kgr.-RR-ikgr. erreicht.

Generell lag ein signifikanter Gruppenunterschied vor. Die Erwachsene reagierten mit durchschnittlich 379 ms signifikant schneller als die Kinder mit im Schnitt 414 ms [$F_{(1; 97)} = 7,49$; $p < 0,01$; $\text{part } \eta^2 = 0,07$]. Auch der Einfluss der Kongruenz auf die RT erwies sich als signifikant [$F_{(1; 97)} = 1703,43$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,9$] (siehe Abb. 13). Insgesamt waren die Probanden bei kgr. Trials im Mittel um 96 ms schneller als bei ikgr. Trials, ohne dass das Alter einen Einfluss darauf hatte [$F_{(1; 97)} = 3,22$; $p = 0,08$; $\text{part } \eta^2 = 0,2$]. Auffällig war dabei, dass der Flanker Kongruenz-Effekt bei den Erwachsenen im Vergleich zu den Kindern tendenziell kleiner ausgefallen ist.

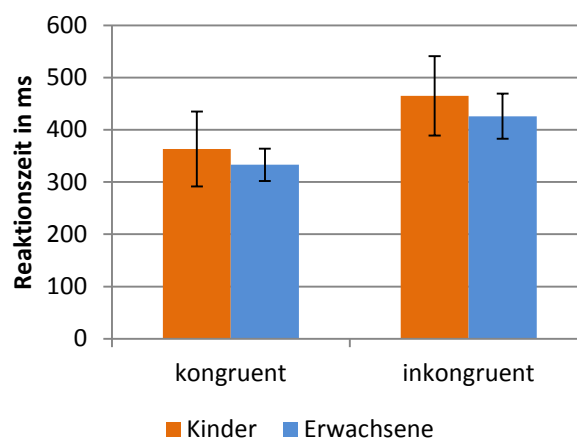


Abb. 13: Durchschnittliche Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen bei kongruenten und inkongruenten Trials. Gegenüberstellung der Reaktionszeiten der Kindern und Erwachsenen bei kongruenten und inkongruenten Trials mit Angabe der SD. Die Kinder zeigten generell langsamere Reaktionszeiten als die Erwachsenen. Inkongruente Trials erforderten längere Reaktionszeiten als kongruente.

Differenziert man den Effekt weiter und testete man den Einfluss der Kongruenz des vorangegangenen Trials auf die RT, so ergaben sich im Durchschnitt bei kgr. Primes eine um 5 ms schnellere RT als wenn ein ikgr. Prime vorherging [$F_{(1, 97)} = 7,39$; $p < 0,05$; part $\eta^2 = 0,07$]. Der Effekt zeigte keinen signifikanten Unterschied innerhalb beider Altersgruppen [$F_{(1, 97)} = 4,47$; $p = 0,04$; part $\eta^2 = 0,04$]. Lag im sowohl im Prime als auch im Probe eine Kongruenz vor, so fielen die durchschnittlichen Reaktionszeiten signifikant schneller aus als bei einer vorliegender Inkongruenz [$F_{(1, 97)} = 68,73$; $p < 0,05$; part $\eta^2 = 0,42$]. Der Kongruenz-Effekt im aktuellen Trial war signifikant größer, wenn der vorangegangene Trial kongruent war als wenn er eine Inkongruenz aufwies [$F_{(1, 97)} = 68,73$; $p < 0,05$; part $\eta^2 = 0,42$]. Dieser Gratton-Effekt war bei beiden Gruppen gleichermaßen nachzuvollziehen [$F_{(1, 97)} = 1,26$; $p = 0,27$; part $\eta^2 = 0,01$] (siehe Abb. 14).

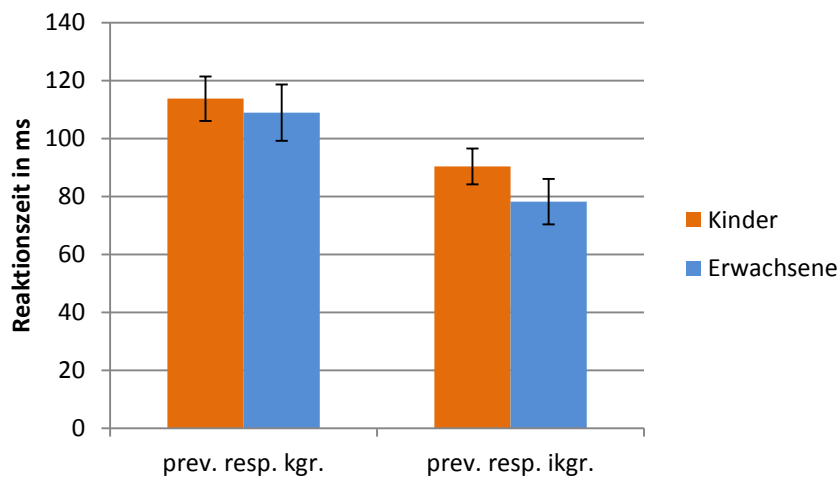


Abb. 14: Durchschnittliche Reaktionszeiten in ms beider Gruppen unter den Bedingungen prev. resp. kgr. oder ikgr. Gegenüberstellung der Reaktionszeiten der Kindern und Erwachsenen unter den Bedingungen prev. resp. kgr oder ikgr. mit Angabe des Standardfehlers. Man erkennt bei beiden Gruppen einen größeren Kongruenz-Effekt (Gratton-Effekt) im aktuellen Trial, wenn der vorangegangene Trial kgr. war.

Für die Bedingung prev. resp. kgr. und Kongruenz des Folgetrials (CC) ergab sich die schnellste mittlere RT. Die langsamste RT konnte beim Kongruenzwechsel von prev. resp. kgr. und Inkongruenz des Folgetrials gemessen werden (CI). Die untersuchten Bedingungen standen nicht signifikant im Zusammenhang mit dem Alter der Probanden [$F_{(1, 97)} = 1,26$; $p = 0,27$; part $\eta^2 = 0,01$].

Auch der Einfluss des Priming-Effekts auf das Leistungsergebnis erwies sich als signifikant [$F_{(1; 97)} = 71,68$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,07$]. Bei der Bedingung RR unterschied sich die durchschnittliche RT mit 412 ms signifikant von der RT bei RC mit 382 ms [$F_{(1; 97)} = 128,45$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,57$] (siehe Abb. 15).

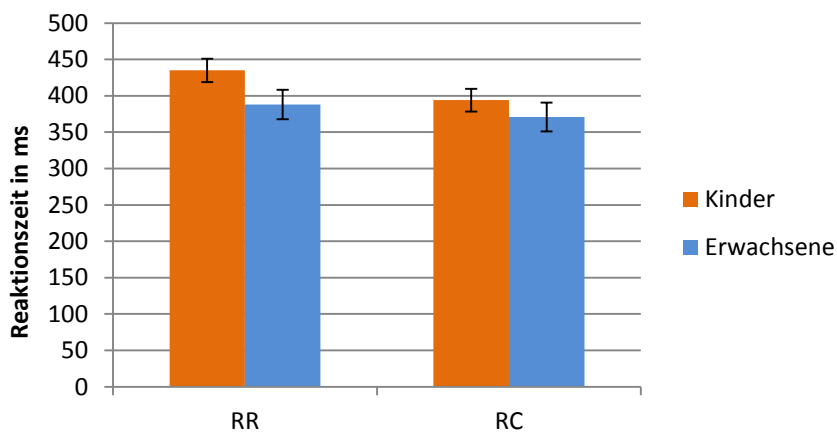


Abb. 15: Durchschnittliche Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen unter den Bedingungen RR und RC.

Gegenüberstellung der Reaktionszeiten der Kindern und Erwachsenen den Bedingungen RR und RC mit Angabe des Standardfehlers. Beide Gruppen zeigen unter der Bedingung RC signifikant schnellere RT als bei RR. Dieser Effekt zeigt sich bei der Kindergruppe signifikant stärker ausgeprägt als bei den Erwachsenen. Generell zeigen die Erwachsenen schnellere Reaktionszeiten als die Kinder.

Der Effekt war signifikant unterschiedlich ausgeprägt in den beiden Altersgruppen [$F_{(1; 97)} = 19,79$; $p < 0,01$; $\text{part } \eta^2 = 0,17$]. Die Kinder zeigten einen deutlich stärker ausgeprägten Effekt als die Erwachsenen, wenn zum vorhergehenden Trial eine RR gefordert wurde (mittlere RT der Kinder: 118,44 ms/ 101,94 ms der Erwachsenen). Bei der Bedingung prev. resp. RC hingegen konnte kein signifikanter Gruppenunterschied festgestellt werden (85,67 ms Kinder vs. 85,16 ms Erwachsene) (siehe Abb. 16).

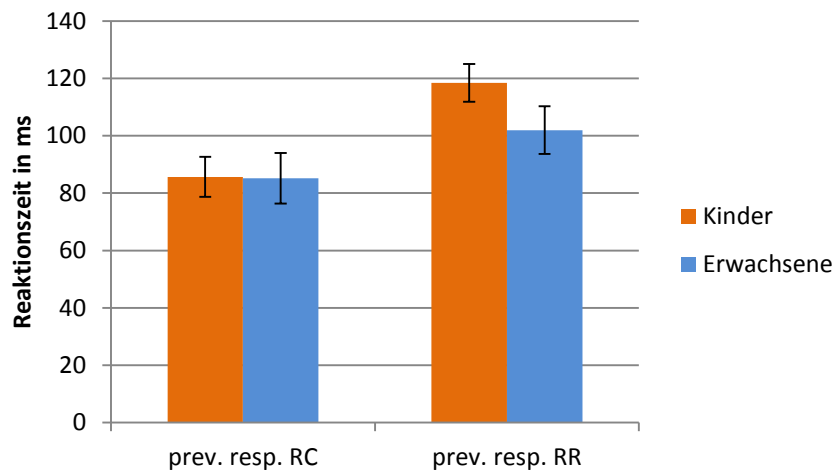


Abb. 16: Durchschnittliche Reaktionszeiten in ms beider Gruppen unter den Priming-Bedingungen prev. resp. RC oder RC. Gegenüberstellung der Reaktionszeiten der Kindern und Erwachsenen bei den Bedingungen prev. resp. RC oder RR mit Angabe des Standardfehlers. Wurde zum vorhergehenden Trial eine RR gefordert, so erkennt man bei den Kindern einen deutlich stärker ausgeprägten Effekt als bei den Erwachsenen. Bei der Bedingung prev. resp. RC konnte hingegen kein Gruppenunterschied festgestellt werden.

Die Testung der Interaktion zwischen der Kongruenz des Primes und dem Priming-Effekt ergab ebenfalls eine signifikante Differenz in der Reaktionszeiten beider Gruppen [$F_{(1;97)} = 24,42$; $p < 0,05$; part $\eta^2 = 0,20$]. Bei Kongruenz im Prime und einem gefordertem RC kam es immer zu schnelleren RTs als bei Prime-Inkongruenz und einer geforderten RR. Dies ließ sich bei beiden Gruppen gleichermaßen nachweisen [$F_{(1;97)} = 1,56$; $p = 0,2$; part $\eta^2 = 0,02$]. Das gleiche Ergebnis ließ sich bei der umgekehrten Variante beobachten [$F_{(1;97)} = 71,68$; $p < 0,05$; part $\eta^2 = 0,43$]. Auch hier kam es bei einer geforderten RC und einer Kongruenz im Probe zu den schnellsten RTs. Allerdings spielte das Alter hier eine signifikante Rolle [$F_{(1;97)} = 7,47$; $p = 0,01$; part $\eta^2 = 0,07$], wobei der Effekt nach der Post hoc-Analyse für die Kindergruppe deutlich stärker ausfällt.

Testete man die Interaktion des Kongruenz-Effekts sowohl im Prime als auch im Probe mit dem Priming-Effekt, so ergaben sich signifikante Unterschiede [$F_{(1;97)} = 35,20$; $p < 0,05$; part $\eta^2 = 0,27$], welche in beiden Altersgruppen gleichermaßen vorzufinden waren [$F_{(1;97)} = 0,95$; $p < 0,3$; part $\eta^2 = 0,01$] (siehe Abb. 12). Generell kam es bei einem geforderten Antwortwechseln zu schnelleren RTs als bei geforderter Antwortwiederholung. Auch bei vorliegender Kongruenz sowohl im Prime als auch im Probe fielen die Reaktionen schneller aus. Die schnellste RT konnte bei der Bedingung prev. resp. kgr.–RC-kgr. festgestellt werden, während die Bedingung prev. resp. kgr.–RR-ikgr. die langsamste RT aufwies.

3.2.3 Reaktionszeit –Variabilität (RT-V)

Die ANOVA zur Berechnung der Reaktionszeit-Variabilität erfolgte nach der klassischen Auswertung unter Berücksichtigung des Faktors Kongruenz und dessen Interaktion mit dem Alter der Probanden. Es konnte gezeigt werden, dass ein signifikanter Altersgruppenunterschied in der RT-V der Kinder und Erwachsenen vorlag [$F_{(1; 97)} = 23,19$; $p < 0,01$; $\text{part } \eta^2 = 0,19$] (siehe Abb. 17). Die Kinder zeigten eine durchschnittliche RT-V von 100,9 ms, die Erwachsenen von 66,6 ms. Die Korrelation des Alters mit der RT-V fiel bei den Kindern deutlich stärker aus als bei den Erwachsenen. Die Analyse ergab, dass bei den Kindern die RT-V mit steigendem Alter signifikant abnimmt (beide $r > -0,48$, $p < 0,01$), während dieser Zusammenhang bei Erwachsenen nicht mehr besteht (beide $r < -0,1$, $p > 0,60$). Auch der Einfluss des Kongruenz-Effekts auf die RT-V erwies sich als signifikant [$F_{(1; 97)} = 0,07$; $p = 0,8$; $\text{part } \eta^2 = 0,01$]. Dieses Ergebnis war nicht altersvariant [$F_{(1; 97)} = 0,34$; $p = 0,55$; $\text{part } \eta^2 = 0,004$]. Die Probanden reagierten im Mittel bei kgr. und ikgr. Trials mit einer RT-V von 84 ms.

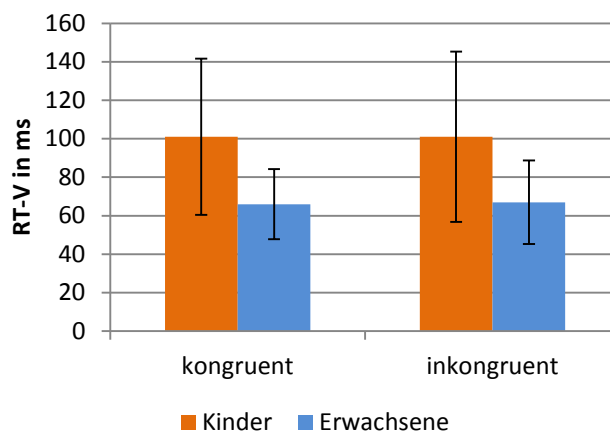


Abb. 17: Durchschnittlichen Reaktionszeit-Variabilität (RT-V) bei kongruenten und inkongruenten Trials. Gegenüberstellung der RT-V der Kindern und Erwachsenen bei kongruenten und inkongruenten Trials mit Angabe der SD. Die Kinder zeigen eine deutlich höhere RT-V als die Erwachsenen.

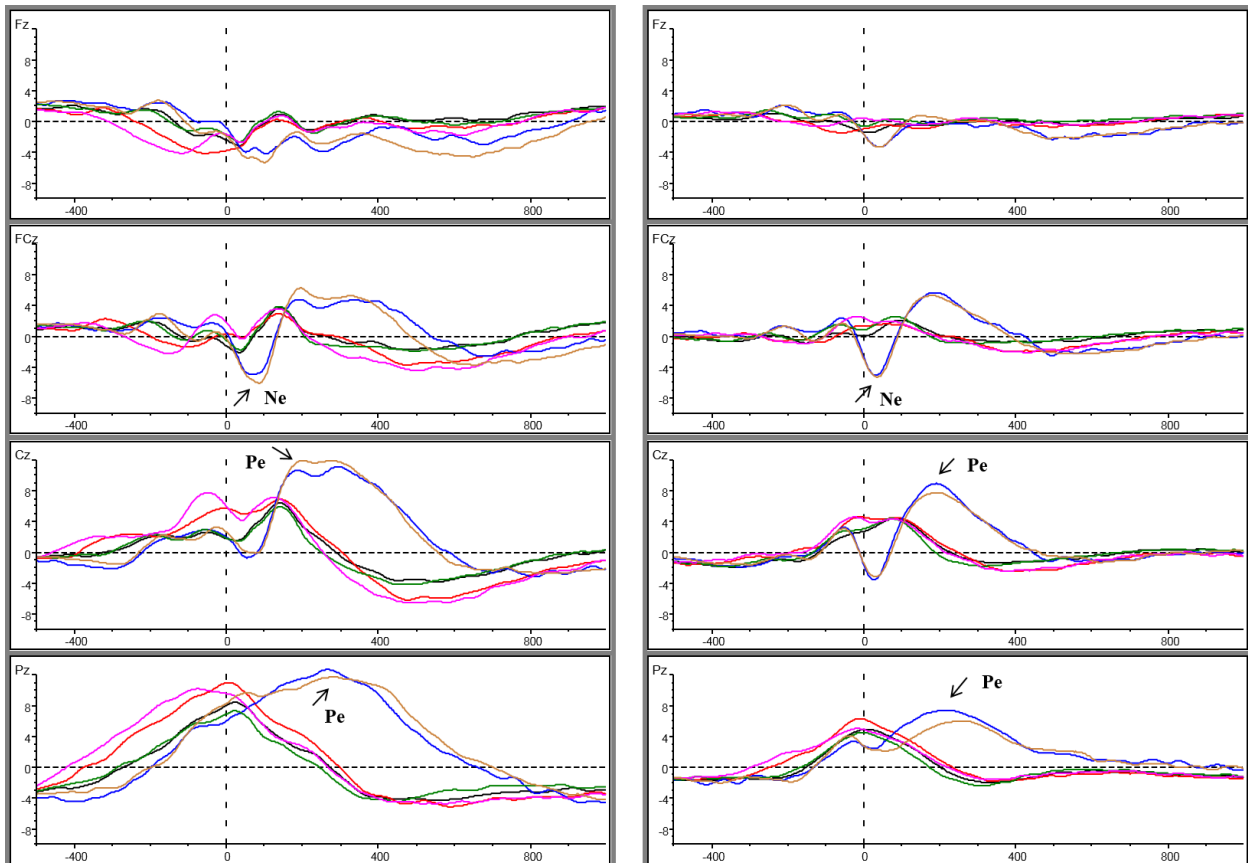
3.3 EEG-Daten: ERPs

Im Folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der fehlerspezifischen Ne und Pe unter Berücksichtigung möglicher Entwicklungs- und Topografie-Effekte dargelegt. Sie werden anhand der Enhancement-Daten beschrieben, welche aus der Differenz von RC-SII und RC-SIC

sowie RR-SII und RR-SIC berechnet werden (Messwerte siehe Tab. 3 und 4 im Anhang). Des Weiteren wurde der Einfluss des Primings (RR/RC) auf die Ne und Pe untersucht.

3.3.1 Entwicklungseffekte und Topografie

Generell konnte bei beiden Gruppen das Vorkommen einer Antwort-bezogenen Ne und Pe nachgewiesen werden. Es lagen keine Unterschiede in der Amplitude der Ne von Kindern und Erwachsenen vor [$F_{(1, 97)} = 0,01$; $p = 0,49$; $\text{part } \eta^2 = 0,00$], während sich Pe signifikant in den beiden Gruppen unterschied [$F_{(1, 97)} = 21,03$; $p < 0,01$; $\text{part } \eta^2 = 0,18$]. Die Kinder zeigten eine deutlich höher ausgeprägte Pe. Sowohl bei der Ne als auch bei der Pe konnte für die Kindergruppe eine längere Latenzzeit als bei den Erwachsenen beobachtet werden (siehe Abb. 18).



a) Kinder

b) Erwachsene

Schwarz: RC-SCC; Rot: RC-SIC; Blau: RC-SII; Grün: RR-SCC; Rosa: RR-SIC; Gelb: RR-SII

Abb. 18: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Ne- und Pe-Maximal-Amplituden an den verschiedenen Elektroden im Gruppenvergleich. a) Gezeigt wird der zeitliche Verlauf der maximalen antwortbezogenen Ne- und Pe-Durchschnittmaxima bei den Kindern unter den Priming-Bedingungen (RC/RR) bei den einzelnen Bedingungen SCC, SIC, SII. b) Gezeigt werden die gleichen Effekte für die Erwachsenengruppe. Man erkennt für beide Gruppen die höchsten durchschnittlichen Ne-Maxima an der Elektrode FCz (siehe Pfeilmarkierung) unter der Bedingung RR-SII (also wenn eine Antwort fehlerhaft beantwortet wurde). Bei Pe sind die höchsten Durchschnittswerte an der Elektrode Pz vorzufinden. Bei den Erwachsenen erkennt man sie bei der Bedingung RC-SII, während sie bei den Kindern unter der Bedingung RR-SII zu sehen sind (siehe Pfeilmarkierung). Generell weisen die Kinder eine stärker ausgeprägte Pe auf, während Ne sich nicht signifikant in den Gruppen unterscheidet. Beide Potenziale fallen nach inkongruenten Trials höher aus. Sie erscheinen beide bei den Kindern mit einer höheren Latenzzeit als bei den Erwachsenen.

3.3.2 Error-negativity (Ne)

Testete man die Interaktion der Topografie mit den Ne-Peaks, so zeigten sich signifikante Unterschiede im Ausfall der Ne an den einzelnen Elektroden Fz, FCz und Cz [$F(2; 194) = 44,21$; $\epsilon = 0,63$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,31$]. Dieser Haupteffekt war bei beiden Altersgruppen gleichermaßen ausgeprägt [$F(2; 194) = 2,30$; $\epsilon = 0,63$; $p = 0,13$; $\text{part } \eta^2 = 0,02$]. Die höchsten durchschnittlichen Ne-Amplituden wurden generell an der frontozentralen Elektrode FCz gemessen (siehe Abb. 19). Diese lagen bei den Erwachsenen in einem Zeitfenster von -25 bis +90 ms und bei den Kindern zwischen +10 und +125 ms (siehe Abb. 23).

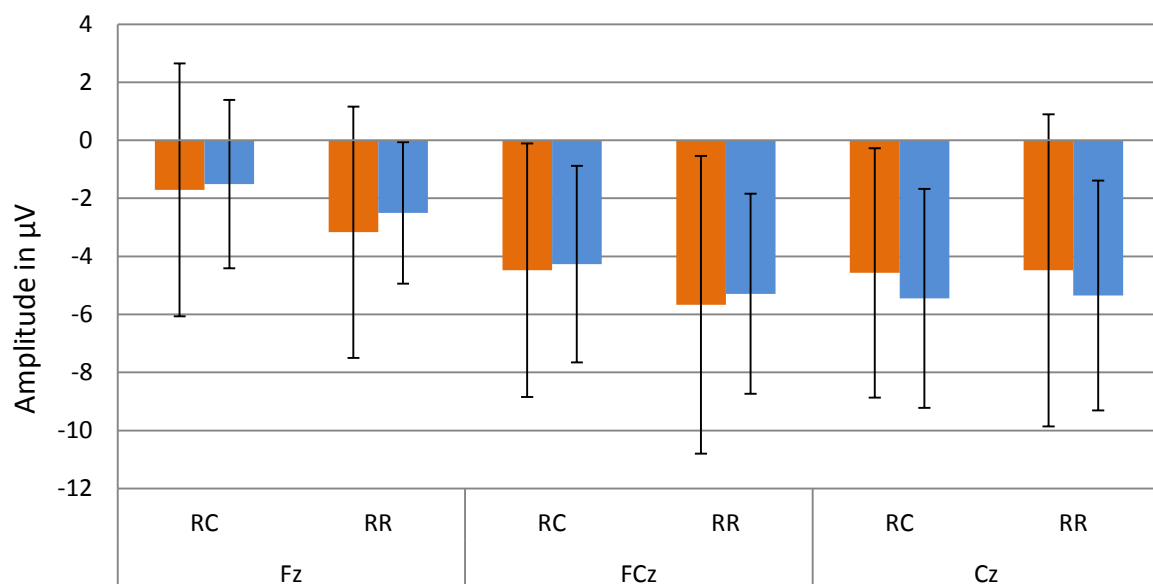


Abb. 19: Durchschnittlichen Ne-Enhancement-Werte von Kindern und Erwachsenen (in µV) im Gruppenvergleich.

Gezeigt werden die berechneten Ne-Enhancement Werte für die Elektroden Fz, FCz und Cz in µV bei den Bedingungen RR und RC mit Angabe der Standardabweichung.

Auch der Einfluss des Primings auf die Ne erwies sich als signifikant [$F(1; 97) = 4,13$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,04$], was in beiden Gruppen gleichermaßen nachzuvollziehen war [$F(1; 97) = 0,09$; $p = 0,77$; $\text{part } \eta^2 = 0,001$]. Generell fiel Ne bei der Bedingung RR deutlich größer aus als bei der Bedingung RC (siehe Abb. 20).

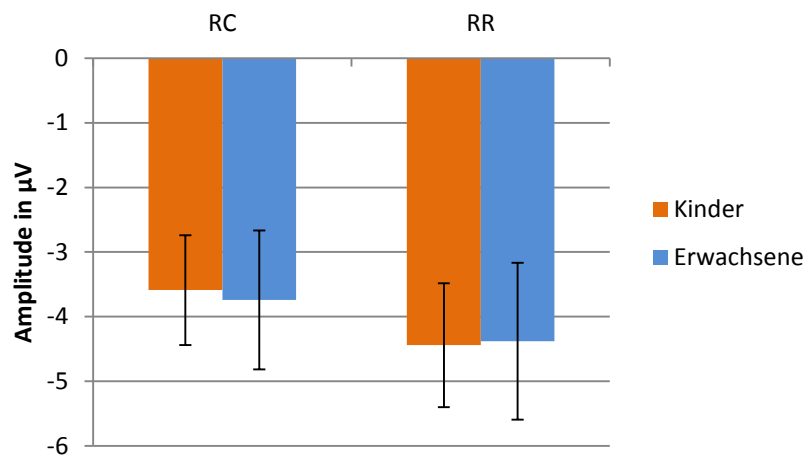


Abb. 20: Durchschnittliche Ne-Enhancement-Werte beider Gruppen unter dem Einfluss des Primings mit Angabe des Standardfehlers.

Gegenüberstellung der Ne-Enhancement-Werte der Kinder und Erwachsenen bei kongruenten und inkongruenten Trials mit Angabe der SD. Die Ne fiel altersunabhängig bei der Bedingung RR deutlich größer aus als bei der Bedingung RC.

Die Interaktion des Primings mit der Topographie der höchsten Ne-Amplitude erwies sich ebenfalls als signifikant [$F_{(2; 194)} = 6,51$; $\epsilon = 0,67$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,06$], ohne einen altersbedingten Unterschied [$F_{(2; 194)} = 0,16$; $\epsilon = 0,67$; $p = 0,76$; $\text{part } \eta^2 = 0,002$]. Die höchsten Ne-Durchschnittsmaxima konnten unter der Bedingung RR an der Elektrode FCz gemessen werden. Differenzierte man den Ausfall der Ne unter den einzelnen Bedingungen, so ergaben sich bei der Bedingung SII die höchsten durchschnittlichen Ne-Amplituden ($-3,23 \mu\text{V}$), gefolgt von SIC ($1,81 \mu\text{V}$) und SCC ($1,03 \mu\text{V}$) (siehe Abb. 23, 24 und 25).

3.3.3 Error-positivity (Pe)

Auch bei der Pe lag ein signifikanter Topografieunterschied an den Elektroden Pz und Cz vor [$F_{(1; 97)} = 4,64$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,05$], welcher bei beiden Gruppen gleichermaßen zu sehen war [$F_{(1; 97)} = 4,33$; $p = 0,04$; $\text{part } \eta^2 = 0,04$]. Ihre durchschnittlichen Maxima konnten generell an der zentro-parietalen Elektrode Pz in einem Zeitfenster von +100 bis +400 ms gemessen werden (siehe Abb. 23). Der Einfluss des Primings auf die Pe war nicht signifikant [$F_{(1; 97)} = 1,30$; $p = 0,26$; $\text{part } \eta^2 = 0,01$], allerdings beeinflussten die Bedingungen RR und RC die Pe der Kinder signifikant stärker als die der Erwachsenen [$F_{(1; 97)} = 9,64$; $p < 0,01$; $\text{part } \eta^2 = 0,09$] (siehe Abb. 21). Die Pe fiel bei den Kindern im Durchschnitt bei der Bedingung RR größer aus als bei der Bedingung RC. Bei den Erwachsenen verhielt es sich umgekehrt.

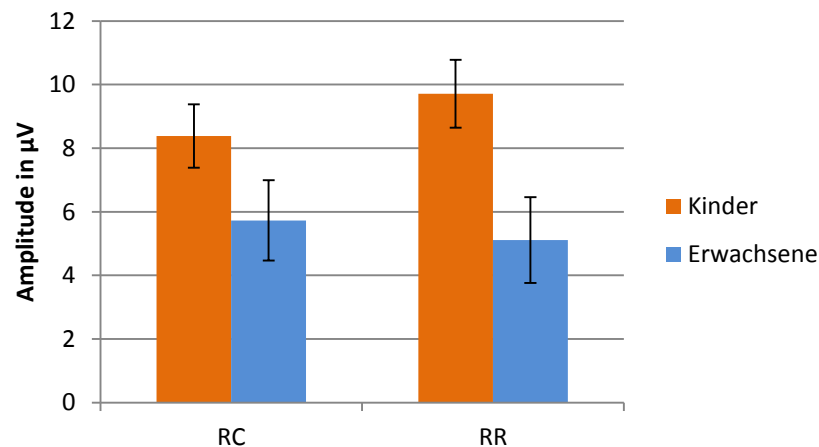


Abb. 21: Durchschnittliche Pe-Enhancement-Werte beider Gruppen unter dem Einfluss des Primings.

Gegenüberstellung der Pe-Enhancement-Werte der Kinder und Erwachsenen bei den Bedingungen RC oder RR mit Angabe der SD. Generell erwies sich der Einfluss des Primings auf die Pe als nicht signifikant. Zu erkennen ist, dass die Pe bei den Kindern unter der Bedingung RR durchschnittlich größer ausgefallen ist als bei der Bedingung RC. Bei den Erwachsenen verhielt sich dieser Effekt umgekehrt.

Die Interaktion des Topographie- und des Priming-Effekts mit den höchsten durchschnittlichen Pe-Maxima erwies sich als signifikant [$F_{(1; 97)} = 10,40$; $p < 0,05$; $\text{part } \eta^2 = 0,10$]. Gruppenunterschiede lagen nicht vor [$F_{(1; 97)} = 0,02$; $p = 0,90$; $\text{part } \eta^2 = 0,00$]. Der höchste durchschnittliche Pe-Ausschlag konnte generell an der Elektrode Pz unter der RR-Bedingung gemessen werden (siehe Abb. 22). Wie auch bei Ne fielen die maximalen Durchschnittsamplituden der Pe bei der Bedingung SII am größten aus ($7,90 \mu\text{V}$) (siehe Abb. 23, 24 und 25).

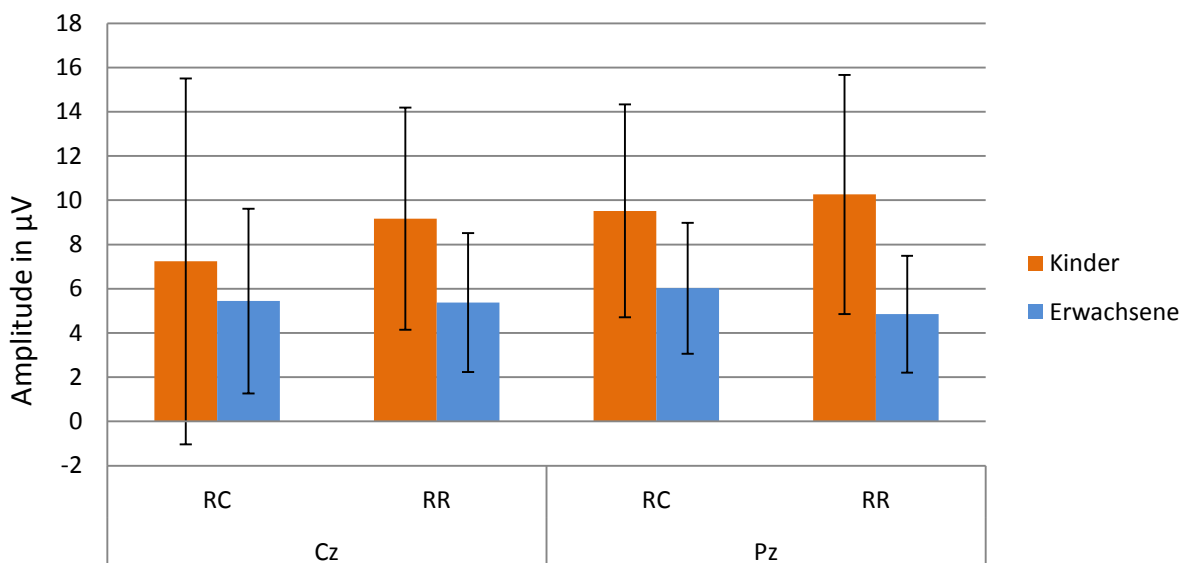


Abb. 22: Durchschnittlichen Pe-Enhancement-Werte von Kindern und Erwachsenen (in µV) im Gruppenvergleich.

Gezeigt werden die berechneten Pe-Enhancement Werte für die Elektroden Cz und Pz in µV bei den Bedingungen RR und RC mit Angabe der Standardabweichung.

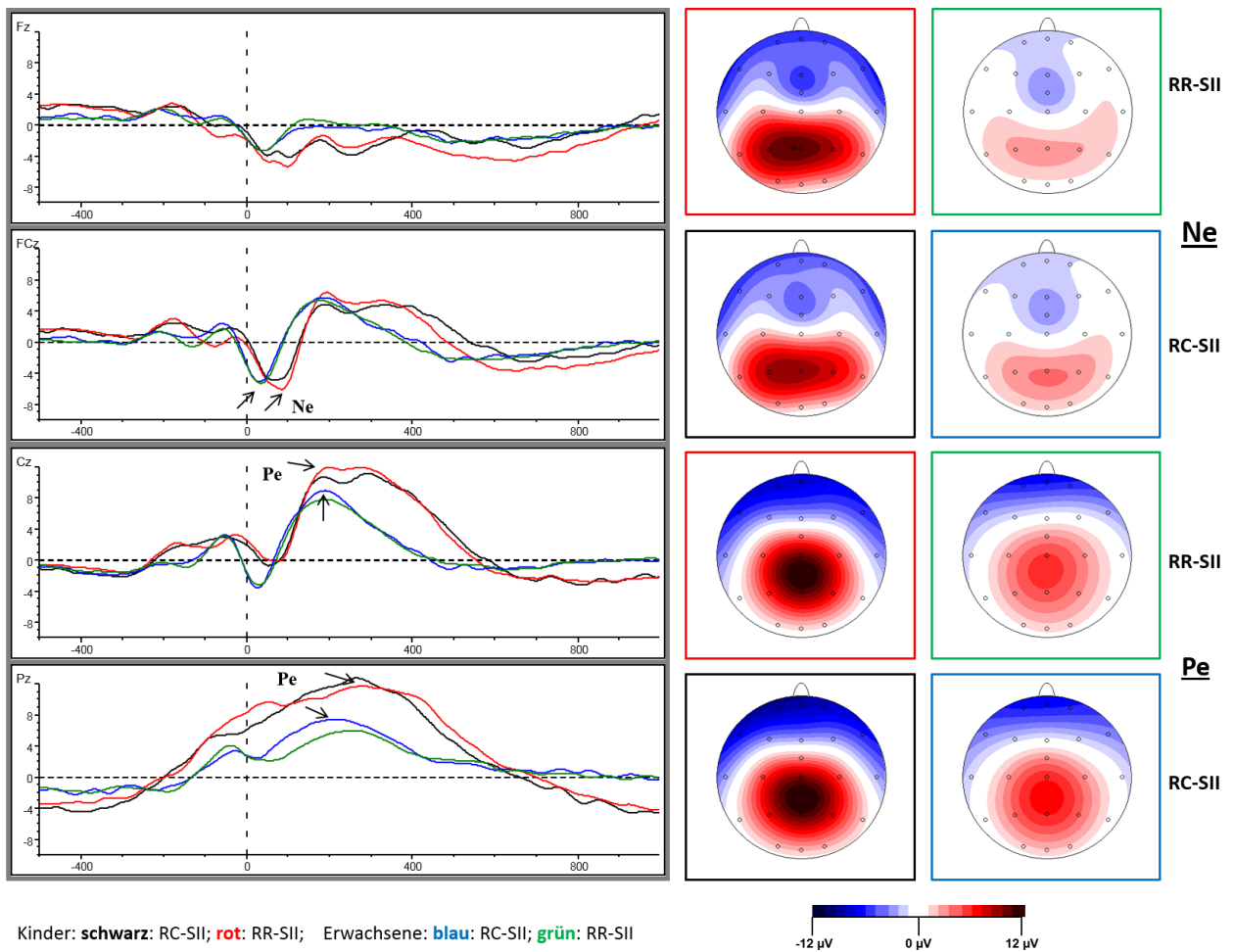
SII-Bedingung

Abb. 23: Zeitlicher Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe für die Bedingungen RC/RR-SII. In der Abbildung werden der zeitliche Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe sowie die topografischen Unterschiede bei Kindern und Erwachsenen unter den Bedingungen RC/RR-SII illustriert. Bei beiden Gruppen erkennt man die höchsten Ne-Durchschnittsmaxima an der Elektrode FCz unter der Bedingung RR-SII (siehe Pfeilmarkierungen). Die höchsten Pe-Werte können bei beiden Gruppen an der Elektrode Pz gemessen werden, allerdings bei den Kindern unter der Bedingung RR-SII und bei den Erwachsenen bei RC-SII (siehe Pfeile). Die Pe der Kinder ist signifikant stärker ausgeprägt als die der Erwachsenen.

SIC-Bedingung

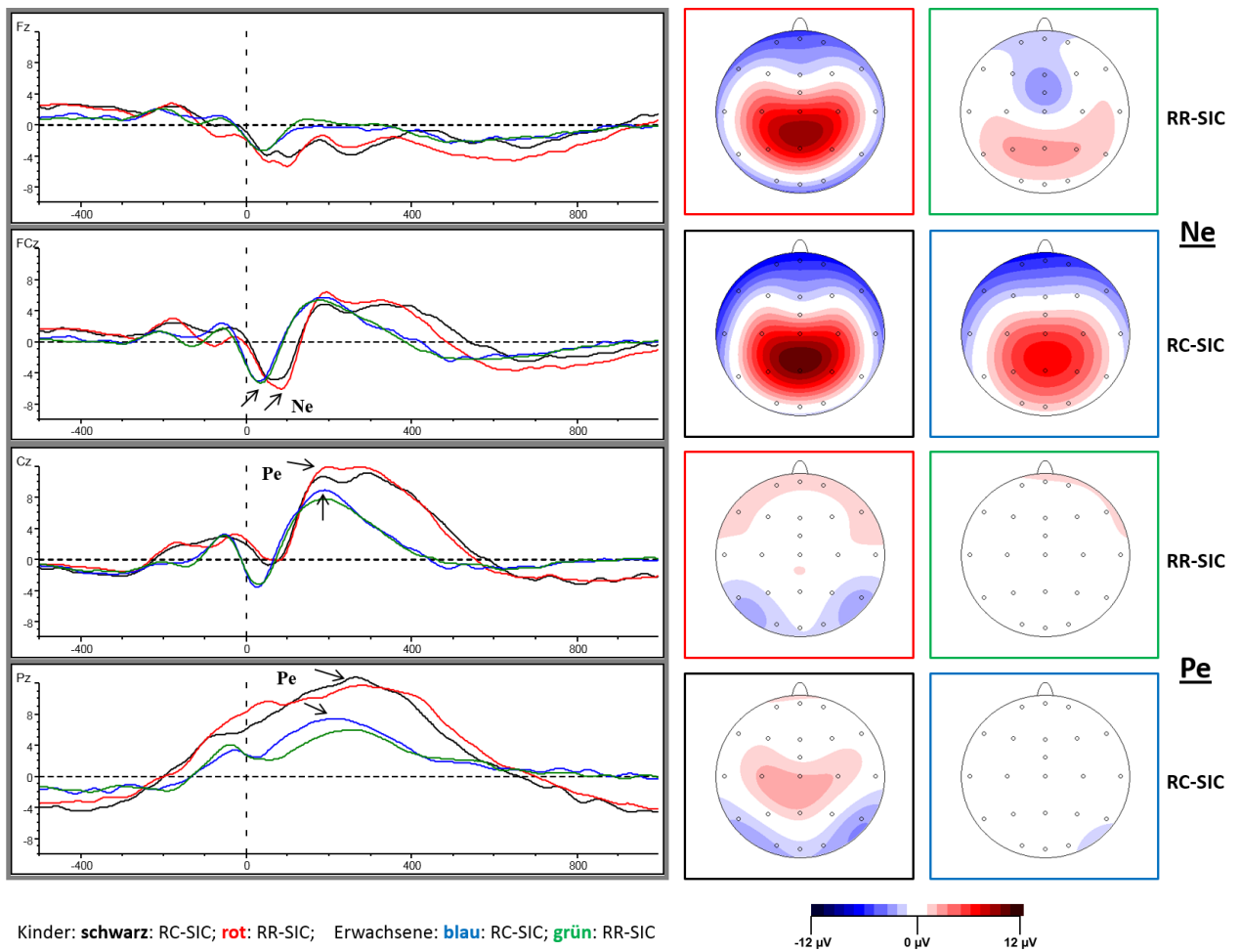


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe für die Bedingungen RC/RR-SIC.

In der Abbildung werden der zeitliche Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe sowie die topografischen Unterschiede bei Kindern und Erwachsenen unter den Bedingungen RC/RR-SIC illustriert. Bei beiden Gruppen erkennt man schwache Ne-Durchschnittsmaxima an der Elektrode FCz unter der Bedingung RR-SIC (siehe Pfeilmarkierungen). Die Pe ist bei den Erwachsenen unter der Bedingung RC-SIC zu sehen, bei den Kindern unter der Bedingung RR-SIC. Die Pe der Kinder ist signifikant stärker ausgeprägt als die der Erwachsenen. Sowohl Ne als auch Pe treten bei den Kindern mit einer höheren Latenzzeit auf als bei den Erwachsenen.

SCC-Bedingung

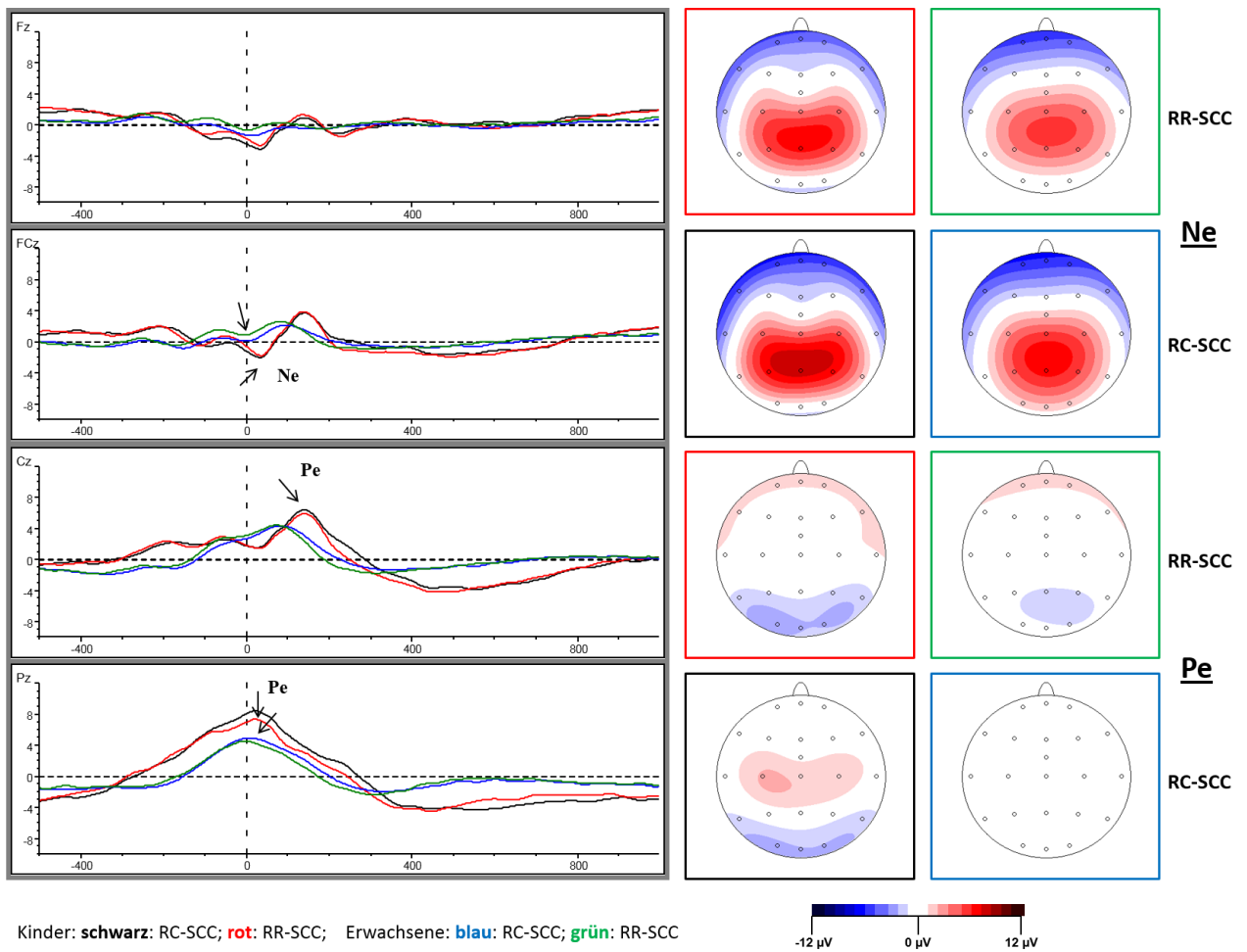


Abb. 25: Zeitlicher Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe für die Bedingungen RC/RR-SCC. In der Abbildung werden der zeitliche Verlauf und die Topografie der antwortbezogenen Ne und Pe sowie die topografischen Unterschiede bei Kindern und Erwachsenen unter den Bedingungen RC/RR-SCC illustriert. Bei beiden Gruppen erkennt man schwache Ne-Durchschnittsmaxima an der Elektrode FCz unter der Bedingung RR-SCC (siehe Pfeilmarkierungen). Die Pe ist bei den Erwachsenen unter der Bedingung RC-SCC zu sehen, bei den Kindern unter der Bedingung RR-SCC. Die Pe der Kinder ist signifikant stärker ausgeprägt als die der Erwachsenen.

4 Diskussion

4.1 Probandenauswahl

Insgesamt erfüllten $n=157$ Probanden die Einschlusskriterien für die Studie und bei $n=99$ Probanden konnte ein kompletter Datensatz verarbeitet und statistisch ausgewertet werden. Das Geschlechterverhältnis verschob sich nach dem Ausschluss der Dropouts durch die Analyse Kriterien tendenziell zugunsten der männlichen Probanden ($n=93♂/n=61♀$ (3:2) vs. $n=64♂/n=35♀$ (2:1)). Die tendenziell höhere Dropout-Rate der weiblichen Teilnehmer und die damit einhergehenden generell niedrigeren Fehleranzahlen dieser Gruppe könnte darin begründet sein, dass Frauen generell gewissenhafter und sorgfältiger handeln als Männer und sie generell stärker darauf bedacht sind, Aufgaben möglichst fehlerfrei und präzise zu lösen. Dieses Verhalten bei Mädchen konnte auch in anderen Studien beobachtet werden (Kim et al. 2007). Auffällig war die hohe Standardabweichung innerhalb der Kindergruppe (ratio ca. 2), welche annähernd doppelt so groß war wie bei den Erwachsenen. Dieser Effekt kann zum einen auf die ungleichmäßige Verteilung der Teilnehmerzahlen auf die beiden Probandengruppen (ratio= 1,61), zum anderen auf die große Altersspanne innerhalb der Kindergruppe zurückzuführen sein. In der Kindergruppe befanden sich fast doppelt so viele Probanden ($n=61$) wie in der Kontrollgruppe der Erwachsenen ($n=38$). Dies führte dazu, dass die Aussagekraft des t-Tests angezweifelt werden musste und eine Validität der Signifikanzen auf nominellen Niveau nicht gegeben war. Um eine Falschbewertung der Ergebnisse zu vermeiden, wurde das Signifikanzniveau bei den Ergebnissen der Testung von Einflussunterschieden verschiedener Faktoren zwischen Erwachsenen und Kindern (Innersubjektfaktoren) nach der Studie von Ramsey (1980) auf $\alpha=0,01$ angehoben, um das konventionelle Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ sicher einzuhalten. Ein derartiger Unterschied der Standardabweichung kann zudem anhand der unterschiedlichen Entwicklungsstadien von Kindern vs. Erwachsenen erklärt werden. Während die Erwachsenen bereits ein recht stabiles Niveau erreicht haben, befinden sich die Kinder in dem hier gewählten Altersbereich noch in einer dynamischen Entwicklungsphase. Um die Ergebnisse in weiterführenden Studien besser beurteilen zu können und derartige Unterschiede der Standardabweichung zu vermeiden, erscheint es sinnvoll, die Teilnehmerzahlen beider zu vergleichenden Gruppen annähernd gleich zu gestalten. Zudem kann es hilfreich sein, das Altersspektrum der Kinder enger einzugrenzen und bestimmte

Altersbereiche voneinander zu trennen. Auch eine höhere Anzahl an Studienteilnehmern sollte in weiterführenden Untersuchungen angestrebt werden, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen.

4.2 Hypothesen

Hypothese I

Die Hypothese I besagt, dass Kinder generell mehr Fehler bei der Beantwortung der Eriksen Flanker Task machen als die Erwachsenen. Die Fehleranzahlen beider Gruppen wurden im direkten Vergleich betrachtet. Bei dieser Fragestellung sollten gezielt mögliche Verhaltensunterschiede zwischen den Kindern und den Erwachsenen untersucht werden. Die Hypothese konnte in der vorliegenden Studie bestätigt werden. Dies könnte Ausdruck dafür sein, dass die Entwicklung verschiedener Hirnareale, welche für eine präzise Ausführung exekutiver und motorischer Funktionen verantwortlich sind, im Kindesalter noch nicht vollends abgeschlossen ist. Das Ergebnis dieser Studie deckt sich mit Ergebnissen anderer Studien, in denen Erwachsene bei Matching-Aufgaben schnellere und bessere Leistungen erbrachten als jüngere Probanden (Wendelken et al. 2011). Der Entwicklungsrückstand der für Aufmerksamkeitsprozesse wichtigen Strukturen wie der anteriore cinguläre Kortex könnte damit einhergehen, dass Kinder durch die Interferenz der Flanker stärker ablenkbar sind als Erwachsene, was die erhöhte Fehlerquote und die längere RT erklärt. Auch die Ausdauer der Kinder, sich auf eher stupide, abwechslungsarme und einfarbige Dreiecke zu konzentrieren ist gegenüber den Erwachsenen als geringer anzunehmen. Möglicherweise sehen die Kinder die Flanker Task eher als Spiel und benötigen viel mehr Abwechslung um ihr Interesse aufrecht zu erhalten und das Tempo beizubehalten. Zwar sollen die Feedbacks die Probanden weiter motivieren, doch ist es unklar, ob diese bei den Kindern wirklich den gleichen Effekt haben wie bei den Erwachsenen. In einer Studie von Uebel et al. (2010) konnte bereits gezeigt werden, dass ein unmittelbares Feedback bei Kindern zu besseren Leistungen führte. Zu beachten ist jedoch, dass das Feedback in der genannten Studie eine Belohnungsfunktion besaß und die Kinder ihre während der Aufgabe gesammelten Punkte am Ende gegen einen realen Preis eintauschen konnten. In unserem Versuchsaufbau war das Feedback nicht mit einer realen Belohnung verbunden. Generell wissen Erwachsene anhand ihrer Lebenserfahrung vermutlich

besser mit Test-Situationen umzugehen als Kinder, die vielleicht zum ersten Mal in ihrem Leben mit einer solchen Aufgabe konfrontiert wurden. Auch bei den grundsätzlich langsameren Reaktionszeiten der Kinder muss der Entwicklungsgrad berücksichtigt werden. Sowohl die für die motorischen Fähigkeiten als auch andere für die Ausübung exekutiver Kontrolle zuständigen Regionen sind im Kindesalter noch geringer ausgeprägt (Tamnes et al. 2013). Hinzu kommt der Myelinisierungsgrad der Neuronen, welcher bei den Kindern geringer ist als bei den ausgewachsenen Probanden (Casey et al. 2005). Da eine dickere Myelinscheide der Neuronen mit einer schnelleren Reizweiterleitung einhergeht, scheint das schnellere und sicherere Reaktionsvermögen der Erwachsenen eine logische Konsequenz ihres anatomischen und physiologischen Entwicklungsfortschrittes zu sein. Da selbst die Ausführung basaler Handlungen ein koordiniertes Zusammenspiel neuronaler Verschaltungen verschiedener Hirnregionen benötigt, war die hier beobachtete schlechtere Leistung der Kinder zu erwarten und deckt sich mit den Ergebnissen anderer Forscher (Torpey et al. 2012; Tamnes et al. 2012). Man kann auch vermuten, dass Kinder generell andere Strategien verwenden als Erwachsene und dass sie deshalb auch andere kortikale Areale zur Aufgabenbewältigung nutzen. Den Erwachsenen steht ein Zugang zu viel höher entwickelten Arealen des präfrontalen Kortex zur Verfügung, welche hingegen im Kindesalter noch nicht vollständig ausgebildet sind. Es ist eine logische Schlussfolgerung, dass es bei Probanden verschiedener Altersklassen bei der Bearbeitung von Selektionsaufgaben durch die Beanspruchung unterschiedlicher Hirnregionen und gebahnter Regelkreise zu unterschiedlichen Strategien kommen muss, woraus dementsprechend Reaktionszeitunterschiede der Gruppen folgen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bessere Leistung der Erwachsenen im Vergleich zu den Kindern bezogen auf die Fehlerzahl und Reaktionszeit weitestgehend auf den weiter fortgeschrittenen Entwicklungsstand ihrer anatomischen und physiologischen Strukturen sowie auf ihre individueller Erfahrung zurückzuführen ist.

Hypothese II

Wie in der Hypothese erwartet, konnte bei den Kindern eine signifikant höhere Reaktionszeit-Variabilität festgestellt werden als bei den Erwachsenen. Auch diese Hypothese forderte einen direkten Vergleich der Kinder- und Erwachsenenendaten. Das Ergebnis ist ebenfalls am ehesten

auf die entwicklungsbedingten Unterschiede beider Altersgruppen zurückzuführen, da in einer post-hoc Analyse die Reaktionszeit-Variabilität bei Kindern mit steigendem Alter signifikant abnahm (beide $r > -0,48$, $p < 0,01$), wohingegen dieser Zusammenhang bei Erwachsenen nicht mehr bestand (beide $r < -0,1$, $p > 0,60$). Eine derartige Differenz könnte möglicherweise verringert werden, indem eine kleinere Altersspanne bei der Gruppe der Kinder gewählt wird. Die großen Altersunterschiede innerhalb der Kindergruppe führen sicherlich zu beträchtlichen Differenzen der kognitiven und motorischen Fähigkeiten der einzelnen Kinder, sodass einige aufgrund ihrer weiter fortgeschrittenen Entwicklung bessere Voraussetzungen für schnellere und präzisere Reaktionen haben als andere. Hinzu kommen mögliche, vom IQ unabhängige intraindividuelle Unterschiede der Probanden bedingt durch ihr soziales Umfeld, ihrer Erziehung und ihrer Einstellung gegenüber solchen Aufgaben.

Zusammenfassend lässt sich die signifikant höhere Reaktionszeits-Variabilität bei der Kindergruppe am ehesten anhand von Entwicklungsunterschieden begründen, welche einerseits schon innerhalb der Kindergruppe auffallen, andererseits auch zwischen beiden Altersgruppen dieser Studie zu verzeichnen sind.

Hypothese III

Wie in der Hypothese angenommen, zeigten beide Altersgruppen signifikant schnellere Reaktionszeiten und niedrigere Fehlerquoten auf kgr. als auf ikgr. Trials. In dieser Hypothese wurden die generellen Verhaltensdaten beider Gruppen zusammen betrachtet. Das Ergebnis spricht dafür, dass die Bearbeitung kgr. Aufgaben weniger aufwändige Denkprozesse erfordert als die Bearbeitung ikgr. Trials. Auch in früheren Studien konnte dieser Zusammenhang bereits beschrieben werden (DeSchepper und Treisman 1991; Milliken et al. 1994; Davies et al. 2004). Im Flanker Task sind im kgr. Fall alle präsentierten Stimuli mit der gleichen Reaktion assoziiert. Müssen hingegen Flanker vom Target differenziert werden, kommt es zu einem Konflikt und zur Interferenzwirkung der Distraktoren. Das Target muss zunächst selektiert und isoliert werden, während die Flanker inhibiert oder aber aktiv vom weiteren Verarbeitungsprozess ausgeschlossen werden müssen, ein zusätzlicher Aufwand, welcher die verlängerte RT und das erhöhte Fehlerrisiko erklärt, wie auch schon Eriksen und Kollegen zeigten (Eriksen und Eriksen 1974; Eriksen und Schultz 1979). Der Effekt spricht auch dafür, dass auch die Flanker bis in eine

gewisse interne Verarbeitungsebene vordringen müssen, damit sie im ikgr. Fall einen negativen Einfluss auf die Leistung ausüben können, wie es bereits Mattler (2003) vermutete. Vergleich man die Verhaltensdaten der Kinder unter dieser Fragestellung im direkten Vergleich zu denen der Erwachsenen, so ist zu beachten, dass der Kongruenz-Effekt in dieser Studie bei den Erwachsenen tendenziell stärker ausgeprägt war und die Kinder eher zur Interferenz durch die Flanker neigten. Die Erwachsenen zeigten bei ikr. Trials grundsätzlich mehr richtig beantwortete Trials als die Kinder. Dies spricht dafür, dass Kinder aufgrund ihres im Vergleich zu den älteren Probanden noch nicht so weit entwickelten Gehirns anfälliger für Ablenkung sind und ihre Konzentration noch nicht so gut steuern können. Die ikr. Testbedingung stellt für die Kinder noch eine größere Herausforderung dar, für dessen Bearbeitung ihnen noch nicht die gleichen Ressourcen zu Verfügung stehen wie den Erwachsenen. Auch die Testlänge könnte dies beeinflussen, sodass sich bei den Kindern nach und nach ihre Aufmerksamkeit verringert. *Zusammenfassend* betrachtet wiesen beide Probandengruppen schnellere RTs und niedrigere Fehlerquoten auf, wenn ein kgr. Trial vorlag, was zum einen dafür spricht, dass kgr. Aufgaben generell einfacher zu bearbeiten sind als ikgr. Zum anderen zeigt das Ergebnis, dass auch als irrelevant eingestufte Informationen in den Verarbeitungsprozess relevanter Items eingeschlossen werden und das Verhalten beeinflussen. Dass dieser Kongruenz-Effekt bei den Kindern stärker zu beobachten war als bei den Erwachsenen spricht wieder für die entwicklungsbedingten Unterschiede in den kognitiven und motorischen Fähigkeiten.

Hypothese IV

Die Hypothese, dass die Kongruenz eines Prime-Trials generell einen Einfluss auf die Leistung beider Gruppen bei der Beantwortung des folgenden Probes hat, konnte anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. Unabhängig davon, ob zwischen zwei Trials eine Antwortwiederholung oder ein Antwortwechsel gefordert wurde, erzielten die Probanden beider Altersgruppen generell schnellere RTs, wenn im Prime eine Flanker-Target-Kongruenz vorlag. Dies weist darauf hin, dass die diesbezügliche Beschaffenheit eines vorangehenden Trials einen signifikanten Einfluss auf den jeweils folgenden hat, wie auch schon Ullsperger et al. (2005) beschrieben. Betrachtete man den Kongruenz-Sequenz-Effekt, so ergab sich ein signifikant größerer Kongruenz-Effekt im Probe-Trial, wenn der vorangegangene Prime

kongruent war. Das Ergebnis bestätigt eindeutig das altersunabhängige Vorhandensein des Gratton-Effekts. Dass es bei diesem Effekt keine altersbedingten Unterschiede gab, impliziert, dass auch schon die Kinder gewisse Strategien bei der Bearbeitung des Tests entwickeln und sie wie die Erwachsenen eine Erwartungshaltung entwickeln. Demnach beeinflusst die Kongruenz eines Primes die Erwartung an die Kongruenz des Probes und bestimmt, wie viel Aufmerksamkeit den Probe-Distraktoren geschenkt wird. Der stärkere Interferenz-Effekt nach vorangehenden kgr. Trials unterstützt ebenso die Konflikt-Adaptions-Theorie, nach der ein ikgr. Prime durch ein Signal des ACC die kognitive Leistung im präfrontalen Kortex steigert und durch die somit erhöhte Aufmerksamkeit zu einer verbesserten Leistung führt (Botvinick et al. 2001; Kerns et al. 2004).

Die schnellsten RTs mit 339 ms konnten für beide Gruppen gemessen werden, wenn ein kgr. Probe auf einen kgr. Prime folgte (CC). Hierbei liegt keinerlei Konflikt durch eine Flanker-Interferenz vor und sowohl die Flanker als auch das Target sind mit der richtigen Antwort assoziiert. Demnach kann diese Situation auch als die am einfachsten zu beantwortende Bedingung beschrieben werden. Die erleichterte Beantwortung kann hier sowohl durch ein pP-Effekt hervorgerufen als auch durch den Wiederabruf der bereits bekannten Informationen unterstützt werden, wie es die *episodic-retrieval*-Theorie besagt. Unterstützt wird sie zudem durch den Konkordanz-Effekt aller sich wiederholenden Stimuli.

Die Bedingung CC (kgr. Prime gefolgt von einem kgr. Probe) war sowohl gegenüber CI (kgr. Prime gefolgt von einem ikgr. Probe), II (ikgr. Prime gefolgt von einem ikgr. Probe) als auch IC (ikgr. Prime gefolgt von einem ikgr. Probe) im Vorteil. Wird zwischen zwei kgr. Trials eine RR gefordert, kann von einem pP-Effekt ausgegangen werden, der sowohl von den Prime-Flankern als auch vom Prime-Target ausgeht. Bei CI hingegen könnte die Target-Antwort negativ von den Flankern beeinflusst werden. Ist zwischen diesen Trials eine RC gefordert, so zeigen alle Prime-Stimuli und die aktuellen Probe Flanker in die geforderte Richtung, lediglich das Probe-Target zeigt in die entgegengesetzte Richtung. Es liegt also eine starke Flanker-Interferenz vor, welche die Geschwindigkeit beeinträchtigt. Geht man davon aus, dass Flanker und Target getrennt voneinander aufgenommen werden, so könnte im Fall C-RR-I die inhibierte Prime-Flanker-Antwort, welche nun auch für das Probe-Target gilt, noch nicht so schnell verfügbar sein. Die andauernde Inhibition muss also erst überwunden werden, die Antwort erfolgt verzögert und

die Fehlerrate ist erhöht. Möglicherweise spielt hierbei auch die Art der visuellen Informationsaufnahme eine Rolle. Dies würde bedeuten, dass die Versuchsperson den Prime-Trial als komplettes Paket abspeichert, zu dem eine zugehörige Antwort hinterlegt wird (Hommel 1998). Das Paket enthält dabei sowohl Raum- als auch Merkmals-bezogene Informationen aller Items. Wird im Folgetrial nun ein anderes Paket präsentiert, muss auf dieses eine neue Antwort generiert werden, auch wenn die Reaktion auf das Target die gleiche gewesen wäre wie im Prime. Da das Ergebnis für beide Altersgruppen gleich ausgefallen ist, kann man annehmen, dass die Fähigkeit zum Datenwiederabruf nicht entwicklungsabhängig ist. Auch der Flanker-Effekt, wie er bereits von Frings et al. (2007b) beobachtet wurde, liefert eine Begründung, warum bei der Bedingung C-RR-C schnellere RTs erhoben werden konnten als bei C-RR-I. Demnach beeinflusst die Wiederholung der Prime-Distraktoren im Probe die Antwort auf das Target positiv, wenn dieses sich ebenfalls wiederholt. Sowohl das Target als auch die Flanker führen in dem Fall zum Wiederabruf der gleichen Reaktion, was den Repetitionseffekt des Targets, der eigentlich schon vorhanden sein sollte, unterstützen müsste. Es kommt zu keinem Zeitpunkt zu einem Konflikt, sodass das Antwortprogramm des Primes im Probe lediglich wiederholt werden muss. Dieses Ergebnis lässt sich also ebenso mit der *episodic-retrieval*-Theorie begründen. Bei II hingegen liegt schon im Prime eine Inkongruenz vor, welche an sich schon mit einer längeren Verarbeitungszeit einhergeht als eine kgr. Bedingung.

Die langsamste RT ergab sich bei der Bedingung CI mit 450 ms. Die irrelevanten Objekte führen in dem Fall zu keiner Unterstützung der Antwortfindung und die Aktivierung der korrekten Antwort scheint erschwert. Hier beeinflussen die irrelevanten, inkongruenten Flanker die Antwortfindung negativ und lösen einen Antwortkonflikt aus, dessen Bearbeitung einen zeitlichen Mehraufwand erfordert.

Zusammenfassend steht die generell bessere Leistung beider Probandengruppen nach vorliegender Flanker-Target-Kongruenz des vorangegangenen Trials für das altersunabhängige Vorhandensein des Gratton-Effekts. Somit zeigen auch schon Kinder gewisse Fähigkeiten der Strategieentwicklung und Aufgabenbearbeitung. Erneut erwiesen sich kgr. Bedingungen als einfacher und waren generell mit schnellern Reaktionszeiten verbunden, während bei ikgr. Trials meist eine Interferenzwirkung der Störfaktoren zu längeren RTs und höheren Fehlerzahlen führten. Der erleichternde Effekt der Kongruenz kann sowohl durch einen pP-

Effekt durch den Wiederabruf bereits bekannter Informationen als auch durch einen Konkordanzeffekt hervorgerufen worden sein. Auch die visuelle Aufnahme der Trial-Pakete muss für die Erklärung des Erleichterungseffekts bei kgr. Trials herangezogen werden.

Hypothese V

Die Hypothese, dass die Kinder eine weniger stark ausgeprägte Ne aufweisen als die Erwachsenen, konnte nicht bestätigt werden. Ganz im Gegenteil zeigten sich bei den durchschnittlichen Ne-Amplituden der Kinder und Erwachsenen keine signifikanten Unterschiede. Diese Tatsache konnte bereits von Richardson et al. (2011) beschrieben werden und gibt einen Anhaltspunkt dafür, dass die für die Generierung der Ne notwendigen Hirnareale schon in jungen Jahren entwickelt sind. Das Ergebnis schließt nicht aus, dass sich diese Gebiete im Laufe der Pubertät weiterentwickeln und erst im jungen Erwachsenenalter vollends ausgereift sind, wie es in anderen Studien beschrieben wurde (Santesso et al. 2006; Wiersma et al. 2007; Ladouceur et al. 2007; Santesso und Segalowitz 2008; Torpey et al. 2012). Unterschiede in den Studiendesigns und die Tatsache, dass die gewählten Altersbereiche der Probanden innerhalb der Studien stark variieren, machen es jedoch schwer eindeutige Schlüsse zu ziehen. Unabhängig davon, wie gut die selektiven Fähigkeiten sowie die Inhibitionsmechanismen der Kinder ausgeprägt sind, sind sie bereits in der Lage, eine Fehlerverarbeitung durchzuführen. Dies lässt auch vermuten, dass sie dazu bereit sind, mögliche Strategien zu entwickeln und durchaus ein Lernverhalten aufzuweisen, welches ihre Performance im Testverlauf steigern könnte. Diese Erkenntnis ist grundlegend für das Verständnis der Unterschiede bei der Fehlerverarbeitung von Erwachsenen und Kindern. So sind die Kinder den älteren Probanden nicht zwangsweise unterlegen. Vielleicht führt sogar ihr unterschiedlich weit ausgeprägter Entwicklungsstand des präfrontalen Kortex zu weitergreifenden Möglichkeiten mit Aufgaben und Konfliktsituationen umzugehen, da sie noch nicht von bestimmten Hirnarealen abhängig sind, deren Aufgaben im Erwachsenenalter klar festgelegt wurden. Wie bereits erwähnt, haben sich verschiedene Fähigkeiten bei den Kindern noch nicht vollständig auf zugeordnete Hirnareale spezialisiert, weshalb bei ihnen bei Selektionsaufgaben diffuser verteilte Potenziale im PFC gemessen werden können als bei Erwachsenen. Während bei den Erwachsenen Selektions- und Bearbeitungsvorgänge dem parietalen Kortex und dem inferioren

Gyrus zugeschrieben werden können, verteilen sich die Potenziale des Kinder eher auf die temporalen Hirnbereiche und auf Abschnitte des frontalen Kortex (Casey et al. 2005).

Die fast gleichen Ne-Werte der Kinder und Erwachsenen dieser Studie sprechen gegen die Annahme, dass die Ne nur ein vom dopaminergen System gesteuertes Lernsignal verkörpert und somit eine emotionale Reaktion auf einen Fehler darstellt. Laut Lambe et al. (2000) ist das mdS erst in den jungen Erwachsenenjahren vollständig ausgereift. Wäre die Ne ausschließlich ein Dopamin-abhängiger Faktor, so müsste sich dies in einer verringerten Amplitude der Kinder-Ne im Vergleich zu den älteren Probanden äußern. Ergebnisse anderer Forschungsgruppen stehen mit dieser Annahme im Einklang (Davies et al. 2004; Santesso und Segalowitz 2008). Dennoch schließt das Ergebnis die Beteiligung des mdS an der Generierung der Ne nicht aus, da das System bei den Kindern bereits angelegt und funktionsfähig ist, es aber lediglich noch nicht auf dem gleichen Entwicklungsstand ist wie bei den Erwachsenen. Aufgrund der weit gewählten Altersspanne der Kindergruppe dieser Studie wären allerdings stärker abweichende Ne-Amplituden zu erwarten gewesen. Dies lässt darauf schließen, dass mehrere Faktoren an ihrer Entstehung beteiligt sein müssen, zu denen Prozesse wie die Fehlerdetektion, die erhöhte Wachsamkeit und Bereithaltung für potenzielle Fehler, grundlegende selektive Aufmerksamkeitsfunktionen, die individuelle Einstellung des Probanden, verschiedene Testbedingungen sowie der Einfluss des Dopaminsystems gehören könnten.

Zusammenfassend erwiesen sich wider Erwarten keine signifikanten Unterschiede in der Ne-Amplitude der Kinder und Erwachsenen, was darauf hindeutet, dass die für die Generierung der Ne benötigten Hirnstrukturen bereits in jungen Jahren entwickelt sind. Demnach besitzen auch schon die Kinder ähnliche selektive und exekutive Fähigkeiten bei der Bewältigung von Selektionsaufgaben wie die Erwachsenen. Die Entstehung der Ne scheint multifaktoriell bedingt zu sein, zu der zum einen das mdS, zum anderen Prozesse wie die Fehlerdetektion, die selektive Aufmerksamkeit und die individuelle Einstellung des Probanden beteiligt zu sein scheinen.

Hypothese VI

Wie in der Hypothese formuliert, konnten die maximalen Amplituden von Ne bei den Erwachsenen nach einem Fehler an der fronto-zentralen Elektrode FCz innerhalb eines Latenzbereichs von ca. 80-150 ms gemessen werden. Die ermittelten Zeitfenster von -25 bis +90 ms bei den Erwachsenen und +10 bis +125 ms bei den Kindern erwiesen sich als optimale Zeiträume um die durchschnittlichen, antwortbezogenen Ne-Maxima darzustellen. Damit unterstützt das Ergebnis die aufgestellte Hypothese und entspricht den Erkenntnissen anderer Forschungsgruppen (Falkenstein et al. 2000; Davies et al. 2004; Hoffmann und Falkenstein 2010; Hajcak 2012). Wie erwartet, traten die Ne's der Kinder mit einer höheren Latenzzeit auf als die der Erwachsenen. Der Latenzeffekt könnte anhand der Entwicklungsunterschiede beider Gruppen begründet werden und steht im Einklang zu den generell langsameren Reaktionszeiten der Kinder. Demnach ist nicht nur die motorische Reizantwort der Kinder langsamer als bei den Erwachsenen, auch die zugrundeliegenden exekutiven Prozesse der Fehlerverarbeitung arbeiten entweder langsamer oder schalten sich erst später ein.

Die Messung der Topografieunterschiede ergab signifikante Unterschiede an den einzelnen Elektroden Fz, FCz und Cz. Sowohl die Erwachsenen als auch die Kinder erreichten die höchsten durchschnittlichen Ne-Werte an der Elektrode FCz. Dieses Ergebnis widerspricht der hier aufgestellten Hypothese, dass die Ne-Maxima der Kinder weiter posterior vorzufinden seien, wie es Davies et al. (2004) und Torpey et al. (2012) beschrieben. Es unterstützt jedoch die Erkenntnis, dass sich die Ne der Kinder nicht von der der Erwachsenen unterscheidet. Beides spricht für die bereits angelegten Hirnareale, also dem ACC, in welchem die Ne generiert werden soll. Die Probanden verfügen demnach eindeutig auch schon im Kindesalter über bestimmte kognitive Fähigkeiten, welche es ihnen erlaubten, eine Fehlerverarbeitung durchzuführen. Ob die Kinder dabei die gleichen Strategien entwickeln und die gleichen Mechanismen wie die Erwachsenen verwenden, kann anhand der vorliegenden Studienergebnisse nur vermutet werden, da sich die meisten Haupteffekte nicht signifikant in beiden Altersgruppen unterschieden. Dennoch muss auch an dieser Stelle bedacht werden, dass die Weiterentwicklung und das Ausreifen des präfrontalen Kortex, der motorischen Fähigkeiten sowie der Myelinisierung der Neuronen eine Verbesserung der Performanz mit sich führt. Lediglich die Grundlagen für die ansatzweise gleichen Verarbeitungsprozesse sind bei den

Kindern gegeben. Auch die individuellen Erfahrungswerte können eine Rolle spielen, worin die Erwachsenen den Kindern unumstritten überlegen sind.

Abschließend muss der Einfluss der Kongruenz berücksichtigt werden. Ikgr. Trials gingen mit einer deutlich stärkeren Ne einher als kgr. Trials, was ebenfalls für den grundsätzlich erhöhten Aufmerksamkeitsstatus und die höhere Alarmbereitschaft für Fehler bei vorliegender Inkongruenz spricht.

Zusammenfassend konnten die maximalen fehlerbezogenen Ne-Amplituden bei beiden Gruppen innerhalb eines Latenzbereiches von ca. 80-150 ms an der frontozentralen Elektrode FCz gemessen werden. Demnach muss der für die Generierung der Ne verantwortlich geltende ACC bereits bei den Kindern entsprechend angelegt sein. Die höhere Latenzzeit der Kindergruppe ist am ehesten anhand entwicklungsbedingter Unterschiede zu begründen. Die erhöhte Ne-Amplitude nach ikgr. Trials kann als Zeichen erhöhter Aufmerksamkeit für die schwierigere Testbedingung gewertet werden.

Hypothese VII

Die Hypothese, dass sich die Pe der Kinder nicht von der der Erwachsenen unterscheidet, konnte nicht bestätigt werden. Die Kindergruppe dieser Studie zeigte eine signifikant höhere Pe als die erwachsene Kontrollgruppe. Dennoch widerspricht das Ergebnis nicht unbedingt denen zahlreicher vorhergehender Experimente, in denen die Pe als ein altersunabhängiger Faktor dargestellt werden konnte (Davies et al. 2004; Santesso et al. 2006; Wiersema et al. 2007; Santesso und Segalowitz 2008). Die hier erhobenen Daten sprechen jedoch dafür, dass die Pe ein vom dopaminergen System unabhängiger Parameter der Fehlerverarbeitung sein könnte. Würde sie vom Dopaminsystem beeinträchtigt werden, müsste sie bei den Kindern entweder geringer, oder aber wie die Ne gleichermaßen ausgeprägt sein wie bei den Erwachsenen. Auch ein Zusammenhang zu den kognitiven Fähigkeiten scheint demnach unwahrscheinlich, da diese erst im jungen Erwachsenenalter vollends ausgereift sind (Moser et al. 2011). Sieht man die Pe im Zusammenhang mit dem *post-error-slowness*, also als Zeichen adaptiven Verhaltens nach einem Fehler und als Lernprozess, um die eigene Leistung zu optimieren, so müsste ihre Amplitude mit zunehmenden Alter zunehmen, wie es Grammer et al. (2014) zeigen konnten. Um das Ergebnis dieser Studie zu besser interpretieren zu können, muss man sich den

Entstehungsort der Pe ansehen. Sie wird im rostralen cingulären Kortex gebildet, ein Bereich, der mit der Emotionsbildung assoziiert wird (Vocat et al. 2008). Es scheint, als sei dieser Bereich bei den Kindern stärker aktiv als bei den Erwachsenen, weshalb es zu der höheren Pe-Amplitude kommt. Dies spricht dafür, dass Kinder und Erwachsene grundsätzlich die gleichen Prozesse während der Fehlerverarbeitung durchlaufen, jedoch unterschiedliche Hirnregionen dafür benutzen (Davies et al. 2004). Bei den älteren Probanden haben sich die Hirnareale bereits auf ihre Aufgabenbereiche spezialisiert. So hat der posteriore Anteil des cingulären Kortex bei ihnen weniger mit der Fehlerverarbeitung zu tun als dies noch bei den Kindern der Fall zu sein scheint. Bekanntermaßen reagieren Kinder im Alltag generell emotionaler auf Fehler, tendieren eher dazu zu weinen und sind schneller gelangweilt als Erwachsene. Es erscheint also logisch, dass der Hirnabschnitt, welcher für die Regulierung der Emotionen zuständig ist, bei ihnen stärkere Aktivitäten aufweist als bei Älteren, die ihr Verhalten besser kontrollieren können. Die Abnahme der Pe im Erwachsenenalter muss deshalb keineswegs eine Leistungsminderung bedeuten. Vielmehr scheint sie den Reifungsprozess der kognitiven Fähigkeiten widerzuspiegeln. Allerdings erscheint die Annahme, dass die Pe bei bewusst wahrgenommenen Fehlern auftritt, als unwahrscheinlich, da die Probanden sicherlich nicht jede abgegebene Falschantwort sofort als solche registrieren.

Die Tatsache, dass die Ne's bei beiden Gruppen gleichermaßen auftreten, während sich die Ausprägung ihrer Pe's signifikant voneinander unterscheiden, kann als wichtiger Hinweis dafür gesehen werden, dass die beiden Potenziale unterschiedliche Rollen während der Fehlerverarbeitung spielen könnten.

Zusammenfassend kann die wider Erwarten höhere Pe-Amplitude der Kinder ein Anhaltspunkt dafür sein, dass die Pe ein vom Dopaminsystem unabhängiger Faktor ist. Das höhere positive Potenzial der Kinder scheint in einer stärkeren Aktivität des rostralen cingulären Kortex begründet zu sein, welcher mit der Emotionsbildung assoziiert ist und als Generierungsort der Pe gilt. So zeigen Kinder und Erwachsene während der Aufgabenbewältigung die gleichen Fehlerverarbeitungsprozesse, jedoch benutzen sie dafür unterschiedliche Hirnregionen. Das generell stärker von Emotionen geleitete Verhalten von Kindern im Alltag unterstützt diese Vermutung.

Hypothese VIII

Die maximalen Pe-Amplituden konnten bei beiden Gruppen nach einem Fehler an der zentro-parietalen Elektrode Pz in einem Latenzbereich von ca. 200 – 500 ms gemessen werden. Auch hier erwies sich das ermittelte Zeitfenster von +100 bis +400 ms als ein optimaler Zeitraum um die durchschnittlichen, antwortbezogenen Pe-Maxima darzustellen. Das Ergebnis unterstützt die aufgestellte Hypothese und entspricht den Erkenntnissen anderer Forscher (Falkenstein et al. 2000; Santesso et al. 2006; Torpey et al. 2012). Wie bei der Ne konnten auch hier höhere Latenzzeiten bei den Kindern als bei den Erwachsenen beobachtet werden, welche sich am ehesten durch den Entwicklungsrückstand der Kinder begründen lässt.

Hypothese IX

Hingegen der aufgestellten Hypothese konnten bei geforderten Antwortwechsln (RC) bei beiden Gruppen bessere Leistungsergebnisse gemessen werden als bei geforderten Antwortwiederholungen (RR). Es liegt nahe, dass die Wiederholung zweier identischer Stimuli-Sets zu einer erleichterten Beantwortung führen und der Konkordanz-Effekt hier eng mit einem pP-Effekt einhergehen sollte. Die hier erzielten Ergebnisse stehen allerdings im Gegensatz zu dieser Annahme und widersprechen vielen bisher erlangten Ergebnissen anderer Forscher, bei denen eine geforderte Antwortwiederholung mit kürzeren RTs und besseren Leistungen einhergingen als ein geforderter Antwortwechsel (Rothermund et al. 2005; Gibbons und Frings 2010). Dies lässt sich nicht anhand des Primings erklären. Vielmehr muss hier der Einfluss der Kongruenz und der Distraktoren berücksichtigt werden. Es sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass der positive Konkordanz-Effekt und der Kongruenz-Priming-Effekt nicht getrennt voneinander betrachtet werden sollten, sondern diese sich vielmehr gegenseitig ergänzen. Es ist denkbar, dass die Erwartungshaltung der Probanden einen Einfluss auf das Ergebnis hatte. Aufgrund der wenigen im Flanker Task vorkommenden Variationen der Trials ist es möglich, dass die Testpersonen mit der Zeit ein Bewusstsein für die einzelnen Bedingungen entwickelt haben. Je häufiger sich einzelne Trials wiederholten, desto schneller fanden sie heraus, dass für die Beantwortung iogr. Trials mehr Konzentration und Aufwand nötig ist als für die leichtere kgr. Situation. Das Vorkommen einiger Antwortwechsel-Bedingungen könnte die Erwartung der

Probanden, im folgenden Trial wieder auf einen Wechsel reagieren zu müssen, gesteigert und somit intuitiv ihr Bewusstsein für Veränderungen erhöht haben, während einfache, leicht wiederzuerkennende Trials anscheinend auch mit weniger Aufmerksamkeit bearbeitet werden können. Diese Bahnung könnte dazu führen, dass der Fokus intuitiv vollends auf die RC-Situationen gelenkt wird, welche nun schneller und genauer bearbeitet werden. Zu beachten ist, dass es während des Aufgabenverlaufs immer wieder zu Wiederholungsfehlern während der Trials gekommen ist. Nach einiger Zeit müssten alle möglichen Variationen des Tests einmal vorgekommen sein und man sollte vermuten, dass zu diesem Zeitpunkt zu jeder Bedingung ein wiederabrufbares Antwortprogramm zu Verfügung stehen müsste. Dennoch machten Probanden beider Altersgruppen bei wiederkehrenden Trials Wiederholungsfehler. In folgenden Studien könnte dieser Aspekt untersucht werden, in dem die Fehlerquote beider Probandengruppen im Zeitverlauf betrachtet wird. Demnach müssten zu Testbeginn noch mehr Fehler bei RC-Bedingungen vorliegen als im weiteren Testverlauf. Gegen Ende des Tests sollte diese Bedingung mit einer deutlich gesteigerten Sicherheit beantwortet worden sein. Eine Leistungsverbesserung würde für einen Lernprozess sprechen, bei dem alle möglichen Variationen abgespeichert wurden. Auch eine Strategiebildung könnte dahinter stecken, die sich im Laufe der Aufgabenerfahrung entwickelt und zu einer Optimierung der persönlichen Performance führen kann.

Wie auch schon E. Fox (1995) beschrieb, könnte auch der Zeitdruck dazu geführt haben, dass nicht genügend Zeit für das Wiedererkennen einer sich wiederholenden Episode und für den kompletten Wiederabruf der entsprechenden Gedächtnisspur verblieb. Unter dem hinzukommenden Leistungsdruck konnte die RR-Situation anscheinend nicht schnell genug als solche identifiziert werden, wodurch es zu einer Neubearbeitung des Trials anstatt zu einem Wiederabruf gekommen sein könnte, aus der dann der nP-Effekt resultierte. Die erlernte Prime-zu-Probe-Situation kann dazu verwendet werden, in folgenden Trials schneller und genauer zu antworten, da die entsprechende Probe-Reaktion bereits im Prime vorbereitet wurde, bevor es überhaupt zu Präsentation des Probe-Trials kommt. Je mehr Distraktor-zu-Target-Bedingungen ein Test aufweist, desto eher können Probanden diese Abläufe erkennen und Bahnungen bilden. Der Proband hat bereits erkannt, dass diese Bedingung mehr Ressourcen und Aufmerksamkeit benötigt als simple Target-zu-Target-Wiederholungen, weshalb ihr Vor-

kommen für ihn automatisch mehr hervorsteht. In dieser Studie unterstützt das häufige Auftreten dieser Bedingung (alle Bedingungen kommen gleich oft vor) ihre Detektion. Die Folge sind verringerte nP-Effekte oder gar eine Umkehr zu pP-Effekten. Unterstützt wird diese Vermutung von Studienergebnissen von Frings und Wühr (2007). Sie konnten nachweisen, dass Probanden, welche angaben eine Wiederholung einer Distraktor-zu-Target-Bedingung bemerkt zu haben, besser abschnitten als unter der pP-Bedingung, in der ein Prime-Target im Probe als Target wiederholt wurde, statt einen nP-Effekt aufzuweisen.

Bei C-RC-C könnte zusätzlich der optische erste Eindruck des gesamten Blocks hinzukommen, welcher im Probe schnell den vermuteten Wechsel unterstützt. Allerdings zeigten die RTs keinerlei Vorteil durch einen pP-Effekt, welcher eigentlich bei C-RR-C durch die Konkordanz zu erwarten gewesen wäre. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass der Einfluss der Flanker stärker gewesen sein muss als ein möglicherweise ebenfalls vorhandener pP-Effekt. Auch ein Wiederabruf der hinterlegten Prime-Stimuli, wie er von Rothermund et al. (2005) beschrieben wurde, kann hier nicht zutreffen. Demnach hätten die gespeicherten Informationen aller im Prime dargebotener Reize bei RR zu einer erleichterten Beantwortung des mit ihnen übereinstimmenden Targets führen müssen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der hier beobachtete unerwartete nP-Effekt bei der RR-Situation anhand keiner der beschriebenen nP-Theorien vollständig zu erklären ist. Vielmehr bestimmten Faktoren wie die Kongruenz, der Einfluss der Distraktoren oder die Erwartungshaltung der Probanden die RT beider Gruppen. Allerdings können Prozesse wie die Inhibition irrelevanter Daten, der Wiederabruf bereits bearbeiteter Informationen oder das Wiedererkennen bereits bekannter Situationen in einigen Bedingungen zur Erklärung herangezogen werden. Auch konnte gezeigt werden, dass sich die verschiedenen Theorien nicht unbedingt gegenseitig ausschließen müssen, sondern dass auch Kombinationen unter ihnen sinnvoll erscheinen.

Hypothese X

Die Hypothese, dass die Ne generell größer ausfällt, wenn in einem Probe-Trial eine Antwortwiederholung gefordert wird (RR) als wenn ein Antwortwechsel (RC) verlangt wird, konnte bestätigt werden. Somit konnte ein signifikanter Einfluss des Priming-Effekts auf den

Ausfall der Ne beider Gruppen dargestellt werden. Passend zu den Ergebnissen der Verhaltensdaten wurden unter der Bedingung RR generell höhere durchschnittliche Ne-Amplituden gemessen als bei der eigentlich als schwieriger zu erachtenden RC-Situation. Dies unterstützt die Vermutung, dass die Probanden bei einer Antwortwiederholung mit einem stärkeren Konflikt konfrontiert waren und diesen Aufgabentyp als schwieriger zu lösen erachtet haben. Es widerspricht jedoch der Annahme, dass die Ne auch unabhängig von einem Fehler bei RC messbar sein sollte, da hier ein grundsätzlicher Konflikt zu erwarten wäre. Das Ergebnis spricht für die bereits erwähnte Annahme, dass die Probanden schnell ein Gefühl für die schwierigere RC-Bedingung bekommen und diesem Aufgabentyp intuitiv mehr Aufmerksamkeit schenken. So wird die Bedingung mit mehr Sorgfalt bearbeitet, während die eigentlich als einfacher einzustufende RR-Bedingung vernachlässigt wird und bei ihrer Bearbeitung eine höhere Fehlerquote und eine verlängerte RT resultiert. Nimmt man an, dass die Ne den Vorgang der Fehlerdetektion verkörpert, so sollte bei der RR-Bedingung dieses Flanker Tasks eine höhere Ne-Amplitude zu beobachten sein als bei RC, da hier mehr Fehler begangen wurden. Das gegenteilige Ergebnis dieser Studie widerspricht also auch dieser Theorie. Vielmehr unterstützten die vorliegenden Daten die Annahme, dass die Ne im Rahmen einer Verhaltenskontrolle eine kognitive Antwortkontrolle verkörpert, die nach Falschantworten mit der Fehlerdetektion kombiniert wird (Falkenstein et al. 2000; van Veen und Carter 2006; Carter und van Veen 2007). So kommt es nach inkorrekten Antworten zu einer höheren Ne, jedoch weisen auch korrekte Trials eine leichte Ne-Negativierung auf. Es kommt bei Selektionsaufgaben also grundsätzlich zu einer geringen Grundaktivität, die die Aufmerksamkeit und auch das Erwarten einer möglichen inkorrekten Reaktion verkörpern könnte. Auch die Mismatch-Theorie, bei der ein Abgleich zwischen gegebener und geforderter Reaktion stattfinden soll, kann die erhöhte fehlerspezifische Ne bei der SII-Bedingung erklären.

Des Weiteren muss die Ne fehlerspezifisch betrachtet werden. Ist nach einem kgr. Prime ein Antwortwechsel gefordert, der Proband reagiert aber fälschlicherweise mit einer Antwortwiederholung, so kommt es in diesem Fall wohl zu einem geringen internen Konflikt im Probe. Die fälschlicherweise abgegebene Antwort entspricht schließlich sowohl der des Prime-Targets als auch der der Prime-Flanker. Beide Prime-Stimuli könnten die schnelle fehlerhafte Reaktion im Probe durch eine Vorbahnung veranlasst haben. Ist nach einem kgr. Prime hingegen eine Antwortwiederholung gefragt, der Proband reagiert aber fälschlicherweise mit einem

Antwortwechsel, so sollte ein größtmöglicher interner Antwortkonflikt entstehen, da diese Reaktion durch keinerlei Prime-Stimuli vorgebahnt wurde. Auch hier kann die Einstellung des Probanden, dass ein folgender Antwortwechsel wahrscheinlich ist, die Falschantwort herbeigeführt haben. Das Ergebnis dieser Studie weist genau darauf hin, da bei RR eine generell größere Ne beobachtet werden konnte als bei RC. Lag bei der geforderten RC-Bedingung, die falsch mit einer RR beantwortet wurde, ein ikgr. Prime vor, so könnte auch wieder die Annahme, dass alle Stimuli eines Trials in Form eines kompletten Blocks aufgenommen werden, den niedrigeren Ausfall der Ne erklären. Die hier falsche RR-Reaktion geht in dem Fall mit der Wiederholung des gesamten Prime-Blocks einher.

Zusammenfassend kann die generell höhere Ne-Amplitude nach einer geforderten RR-Bedingung als Zeichen dafür gewertet werden, dass die Probanden ein Gefühl für die eigentlich schwierigere RC-Situation gewinnen und dieser im Aufgabenverlauf mehr Aufmerksamkeit schenken. Aus der Vernachlässigung der eigentlich als einfacher zu betrachtenden RR-Situation könnte der höhere Ne-Wert resultieren. Somit scheint die Ne eine im Rahmen der Verhaltenskontrolle auftretende Antwortkontrolle zu verkörpern, welche nach einer Falschantwort mit der Fehlerdetektion kombiniert wird, aber auch nach Richtigbeantwortung eine gewisse Grundaktivität besitzt. Zudem scheint die Erwartungshaltung des Probanden einen Einfluss auf das Fehlerverhalten zu haben.

Hypothese XI

Die Hypothese, dass die Pe generell größer ausfällt, wenn in einem Probe-Trial eine Antwortwiederholung gefordert wird (RR), als wenn ein Antwortwechsel (RC) verlangt wird, konnte nicht bestätigt werden. Der Priming-Effekt zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Pe, jedoch zeigten die Kinder unter der Bedingung RR höhere positive Potenziale als bei RC, bei den Erwachsenen hingegen war ein umgekehrter Zusammenhang festzustellen. Auch dieses Ergebnis spricht für einen unterschiedlichen Umgang mit Fehlern von beiden Gruppen und einen Entwicklungsprozess, welcher die Hirnregionen mit anderen Aufgabenverteilungen besetzt. Wie bereits erwähnt, löste eine Falschbeantwortung eines kgr. Primes, der eigentlich mit einer Antwortwiederholung einherging, aber mit einem Antwortwechsel beantwortet wurde, den

größten internen Konflikt aus. Man könnte vermuten, dass die erkannte Konfliktsituation bei den Kindern eine erhöhte emotionale Reaktion auf den bemerkten Fehler hervorruft, weshalb ihre Pe unter dieser Bedingung größer ausfällt. Es erscheint daher unplausibel, dass die Erwachsenen bei der RC-Bedingung die höheren Pe-Werte aufwiesen. Aufgrund ihres weiter fortgeschrittenen Entwicklungsstandes wäre bei ihnen ebenfalls bei RR eine erhöhte positive Aktivität zu erwarten gewesen. Es bedarf weiterführende Untersuchungen um dieses Ergebnis besser deuten zu können und um mehr über die Rolle der fehlerspezifischen Pe und ihren Unterschieden bei verschiedenen Altersklassen zu erfahren.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass der Priming-Effekt wider Erwarten keinen signifikanten Einfluss auf die Amplitude der Pe beider Altersgruppen gehabt hat. Dass der Pe-Wert der Kinder bei der RR-Bedingung höher war als bei der RC-Bedingung und sich dies bei den Erwachsenen genau andersherum verhielt, deutet erneut daraufhin, dass sich der Umgang der Kinder mit Fehlern von dem der Erwachsenen unterscheidet. Die unterschiedlichen Entwicklungsgrade der Kinder und Erwachsenen könnte die Kinder emotionaler reagieren lassen. Warum die Erwachsenen hingegen bei RR nicht ebenfalls eine erhöhte Pe-Amplitude aufwiesen bleibt zu klären.

Hypothese XII

Die Hypothese, dass der nP-Effekt auftritt, sobald ein Prime-Distraktor im Probe als Target wiederholt wird (Distraktor-zu-Target-Bedingung), konnte nicht bestätigt werden. Stattdessen konnte unter der besagten Bedingung bei beiden Gruppen ein pP-Effekt beobachtet werden. Bei der Verarbeitung aller präsentierten Stimuli erfahren auch die Distraktoren eine gewisse interne Aufnahme. Es wäre somit denkbar, dass die Flanker gar stärkere Aufmerksamkeit erhalten, da sie zeitlich zuerst präsentiert werden und zudem in doppelter Anzahl vorkommen. Dass die Anzahl der Distraktoren die Handlungsausübung beeinflussen konnte bereits nachgewiesen werden (Yee 1991; Neumann und DeSchepper 1992). Yee zeigte, dass in einem Aufgabendesign, in dem ein Target von nur einem Distraktor begleitet wurde, kein nP zu finden ist, während die Anwesenheit zweier Flanker zum nP-Effekt führte. Beide genannten Erschwerungs-Faktoren könnten zur Folge haben, dass irrelevante Items in schwierigeren Situationen mehr Aufmerksamkeit erfahren als sie unter leichteren Bedingungen bekommen

würden. Da, wie bereits zuvor beschrieben, Objekte, die am meisten Aufmerksamkeit erfahren auch am wahrscheinlichsten gespeichert und widerabgerufen werden, führt ihre Darbietung im Probe zu einer erleichterten Reaktion. Dies könnte den pP-Effekt bei der Distraktor-zu-Target-Wiederholung-Bedingung dieser Studie erklären. Diese Annahme wird durch die *episodic-retrieval*-Theorie unterstützt. Hinzu kommt, dass in dem nP-Paradigma dieser Studie die Abstände zwischen Flanker und Target konstant relativ klein gehalten sind. Es konnte belegt werden, dass der nP-Effekt mit der Target-Distraktor-Distanz variiert (Fox 1994). Je näher der Abstand ist, desto stärker sind Wahrnehmung und Ablenkfunktion der Flanker und der nP-Effekt ausgeprägt (Miller 1991; Frings und Wühr 2007). Vorherige Studien konnten belegen, dass auch Faktoren wie Schnelligkeit und angestrebte Genauigkeit einen Einfluss auf das nP haben. In dieser Studie wurden die Probanden über ein Motivations-Feedback instruiert, so schnell wie möglich und zusätzlich möglichst genau zu antworten. Ergebnisse vorheriger Experimente zeigten, dass bei Probanden die bemüht waren, möglichst fehlerfrei zu antworten, ein sicher zu beobachtender nP-Effekt auftrat, während unter Zeitdruck gar ein positiver Priming Effekt zu messen war (Neill und Westberry 1987; Neumann und DeSchepper 1992). Forscher konnten ebenso zeigen, dass Inhibitionsmechanismen und das damit assoziierte nP eine gewisse Zeit benötigen, um sich zu entwickeln (Neill und Westberry 1987; Yee 1991; Neumann und DeSchepper 1992; Lupiáñez et al. 2000). Unter Zeitdruck bleibt somit nicht genügend Zeit die Inhibition für einen Prime-Distraktor aufzubauen, so dass seine Präsentation im Probe-Display vermutlich noch aktiviert ist. Auch diese Tatsache könnte die Ursache für den hier vorgefundenen pP-Effekt bei beiden Gruppen bei Distraktor-zu-Target-Trials sein.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass auch die Distraktoren einen signifikanten Einfluss auf den np-Effekt haben. Verstärkt werden könnte ihr Einfluss durch ihr zeitlich früheres Erscheinen oder ihr zahlenmäßig höheres Vorkommen in einer Aufgabe. Eine stärkere Wahrnehmung der Flanker im Vergleich zum eigentlichen Target könnte auch für einen pP-Effekt bei der Distraktor-zu-Target-Bedingung in der vorliegenden Studie verantwortlich sein. Eine weitere Ursache für den pP-Effekt könnte die angestrebte Schnelligkeit und Präzision der Probanden sein, sodass unter dem provozierten Zeitdruck nicht ausreichend Zeit für die Bildung einer Inhibition irrelevanter Items verblieb und der damit assoziierte nP-Effekt nicht zustande kommen konnte.

Hypothese XIII

Die Hypothese, dass sich der nP-Effekt von Kindern und Erwachsenen nicht signifikant unterscheidet, konnte nicht bestätigt werden. Die Kinder wiesen zwischen der RC- und der RR-Bedingung sowohl bei kgr. als auch bei ikr. Trials signifikant höhere Unterschiede auf als die Erwachsenen und zeigten deutlich größere nP-Effekte. Lange Zeit nahm man an, dass das nP ein altersvarianter Effekt sei, der mit der Entwicklung reife und erst im jungen Erwachsenenalter vollends ausgeprägt ist (Tipper et al. 1989). Aktuellere Studien hingegen konnten diese Annahme erfolgreich widerlegen und konnten sein stabiles Auftreten sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen belegen (Pritchard und Neumann 2004; Frings et al. 2007a; Pritchard und Neumann 2009). Auch diese Studie bestätigte das generelle Vorhandensein des nP-Effekts, jedoch zeigten sich altersbezogene Unterschiede in seiner Ausprägung. Damit steht das Ergebnis im Widerspruch zu den von Frings et al. (2007a) erhobenen Daten, bei denen der Effekt bei Kindern und Erwachsenen gleichermaßen ausgeprägt war. Grund für die abweichenden Werte könnten sowohl Unterschiede im Studiendesign als auch im Altersspektrum der Probandengruppen sein. Das Durchschnittsalter der von Frings et al. untersuchten Kindergruppe lag mit 8,4 Jahren deutlich unter dem durchschnittlichen Alter der in diese Studie eingeschlossenen Kindergruppe mit 11,3 Jahren. Zudem wurde ein „color blob test“ eingesetzt, bei dem große mittlere Ziel-Farbkleckse von anders kolorierten Distraktor-Farbklecksen differenziert werden sollten. Das durch die farbliche Gestaltung der Stimuli als kinderfreundlicher anzusehende Studiendesign könnte ein Grund für den geringer ausfallenden nP-Effekt der Kindergruppe in der erwähnten Studie sein. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten hingegen deutlich größere nP-Effekte bei den Kindern als bei den Erwachsenen. Somit muss das Ergebnis nicht unbedingt als Widerspruch der hier aufgestellten Hypothese gesehen werden, vielmehr ist eine Erweiterung der bislang bekannten Theorien denkbar. Die meisten in der Literatur beschriebenen Studien konzentrierten sich eher auf die generelle An- oder Abwesenheit des Effekts bei Kindern und Erwachsenen, als auf die Art seiner unterschiedlichen Ausprägung. Sowohl das angewandte Studiendesign als auch die unterschiedlichen Altersbereiche der Probandengruppen dieser Studie boten die Möglichkeit, den Grad der Ausprägung bei zwei verschiedenen Altersgruppen zu differenzieren. Das Ergebnis spricht für den deutlich weiteren Entwicklungsstand der älteren Probanden, deren kognitiven und

motorischen Fähigkeiten deutlich weiter ausgeprägt zu sein scheinen. Es fällt den Erwachsenen sichtlich leichter mit Konfliktsituationen umzugehen. Wieder sprechen die Daten dafür, dass die Kinder bereits generell über die Anlagen verfügen, welche die Prozesse der Fehlerverarbeitung und der kognitiven Funktionen steuern, jedoch diese bei ihnen erst noch weiter differenziert und spezialisiert werden müssen. Weitere Studien, in denen gleiche Testdesigns bei unterschiedlichen Altersgruppen angewendet und verglichen werden, könnten helfen, die Effektunterschiede weiter zu entschlüsseln und das Phänomen des nP in seiner Entwicklung näher zu untersuchen. Außerdem könnte man durch weiterführende Untersuchungen Erkenntnisse über den Zeitpunkt der vollendeten Entwicklung der zur Fehlerverarbeitung nötigen Hirnregionen erlangen. Zu beachten ist dabei, dass intraindividuelle Unterschiede einzelner Probanden zu keiner Fehlinterpretation der Daten führen dürfen. Eine gut bedachte Auswahl des Probandenkollektivs mit möglichst ähnlichen Voraussetzungen und gleichem Hintergrund kann Ergebnisabweichungen verhindern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kinder generell einen größeren nP-Effekt zeigten als die Erwachsenen. Diese Studie bestätigte das generelle, altersunabhängige Vorhandensein eines nP-Effekts und zeigte altersbezogene Unterschiede in seiner Ausprägung, welche für einen weiteren Entwicklungsgrad der älteren Probanden und deren kognitive und motorische Fähigkeiten sprechen. Das hier angewandte Studiendesign ermöglichte im Vergleich zu vorherigen Studien eine Differenzierung der Ausprägung des Effekts bei zwei verschiedenen Altersgruppen.

4.3 Fazit der Diskussion

Wie auch schon vorherige Studien zeigten, wiesen die Kinder langsamere Reaktionszeiten auf und erbrachten generell eine schlechtere Leistung als die Erwachsenen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist diese Tatsache auf die entwicklungsbedingten anatomischen und neurophysiologischen Unterschiede beider Altersgruppen zurückzuführen. So bedingt wahrscheinlich der geringere Ausreifungsgrad von Hirnstrukturen wie dem präfrontalen Kortex und des zu ihm zählenden anterioren cingulären Kortex sowie der Myelinisierungsgrad der Neuronen das Leistungsdefizit der Kindergruppe. Auch einer der Haupteffekt dieser Studie, dass die Kinder einen stärker ausgeprägten nP-Effekt aufwiesen als die Erwachsenen, lässt sich

anhand dieser Erkenntnisse erklären. Das Ergebnis lässt vermuten, dass die Kinder generell die gleichen Prinzipien der Fehlerverarbeitungen nutzen wie die Erwachsenen, ihre vergleichsweise geringer entwickelten Hirnfunktionen jedoch dazu führen, dass ihnen die Bearbeitung anspruchsvoller Situationen schwerer fällt. Sicherlich spielt hierbei auch die individuelle Lebenserfahrung der Probanden eine Rolle. Die Erwachsenen können auf mehr Erfahrungen guter oder schlechter Art zurückgreifen, während sich die Kinder erst im Bildungsprozess von wichtigen Verknüpfungen befinden.

Die Tatsache, dass sich die Ne der Kinder weder in ihrer Ausprägung noch in ihrer Topografie von denen der Erwachsenen unterschied, kann als Indiz dafür gesehen werden, dass die Fähigkeit zur Fehlerverarbeitung und die dafür zuständigen Hirnareale prinzipiell schon in jungen Jahren angelegt sind, die einzelnen Prozesse jedoch erst im Laufe der Zeit definiert werden. In dieser Studie zeigte die Ne ihre höchsten durchschnittlichen Amplituden sobald es unter der Bedingung RR zu einem Fehler kam; eine Situation, welche mit einem größtmöglichen internen Antwortkonflikt einhergeht. Dies lässt darauf schließen, dass sie keinen Fehlerdetektionsprozess, sondern vielmehr eine kognitive Antwortkontrolle im Rahmen der eigenen Verhaltenskontrolle zu verkörpern scheint. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mehrere Faktoren an der Entstehung der Ne beteiligt zu sein scheinen.

Bei Pe zeigten die Kinder größere Amplituden als die Erwachsenen. Das Ergebnis spricht dafür, dass die Pe ein vom dopaminergen System unanhängiger Faktor der Fehlerverarbeitung sein könnte. Auch ein Zusammenhang zu den kognitiven Fähigkeiten erscheint unwahrscheinlich, da die Pe bei den Kindern demnach geringer oder gleichermaßen ausgeprägt sein müsste als bei den Erwachsenen. Eine Beteiligung des mdS an ihrer Genese ist jedoch nicht auszuschließen. Die höheren Pe-Werte der Kinder könnten das Resultat einer stärker emotional geführten Handlungssteuerung sein, da die Pe im rostralen cingulären Kortex generiert wird und diesem Hirnareal auch die Emotionsbildung zugeschrieben wird. Die geringen Amplituden bei den älteren Probanden scheinen demnach den Reifungsprozess der kognitiven Fähigkeiten zu verkörpern. Die Unterschiede in der Ausprägung der Ne und Pe beider Gruppen legen die Vermutung nahe, dass Ne und Pe unterschiedliche Rollen bei der Fehlerverarbeitung haben müssen.

Einen großen Einfluss auf die Leistung beider Gruppen hatte die Kongruenz der Prime- und Probe-Trials. Kongruente Trials werden schneller und sicherer bearbeitet als inkongruente Trials. Diese Tatsache spiegelte sich auch in dieser Studie wieder. Im kgr. Fall wird die Reaktion von keinerlei Störfaktoren behindert und kann schnell und sicher ausgeführt werden. Bei ikgr. Trials kommt es hingegen zu einer Konfliktsituation und die einzeln zu betrachtenden und zu differenzierenden Distraktoren verlangsamen die Reaktion auf das eigentliche Target. Anders ist dies bei Sequenz-Kongruenz-Effekten. Demnach zeigten beide Probandengruppen im Probe eine deutlich geringere Interferenzwirkung der Distraktoren, wenn der vorangegangene Prime ikgr. war. Dieser altersunabhängige Gratton-Effekt, welcher generell eine bessere und schnellere Leistung bei kgr. als bei ikgr. Trials beschreibt, unterstützt die Ergebnisse anderer Forschungsgruppen und die Konflikt-Adaptations-Theorie. Dies zeigt, dass auch irrelevante Reize eine gewisse interne Verarbeitungsebene erreichen müssen. Die Kinder waren von der Interferenzwirkung generell stärker beeinträchtigt als die Erwachsenen, was mit dem Entwicklungsrückstand zu begründen ist.

Das unerwartete Ergebnis, dass beide Gruppen bei den RC-Bedingungen bessere Ergebnisse gezeigt haben als bei RR, lässt sich mit keiner der hier aufgeführten nP-Theorien vollständig begründen und steht im Widerspruch zu zahlreichen vorherigen Studien. Es zeigt, dass Faktoren wie die Kongruenz, die Erwartungshaltung der Probanden oder die Konkordanz möglicherweise einen weitaus größeren Einfluss auf das Verhalten haben als das Priming. Passend dazu reagierten die Probanden bei einer Distraktor-zu-Target-Bedingung schneller, anstatt ein nP zu zeigen. Das Unterbewusstsein scheint schwierigere Situationen intuitiv hervorheben zu können, sodass diese mit mehr Sorgfalt und Aufmerksamkeit bearbeitet werden als leichtere. Die erhöhte Aufmerksamkeitshaltung könnte für ein schnelles Wiedererkennen der schwierigeren RC-Bedingung und somit für ihre größtenteils fehlerfreie Bearbeitung sorgen, während die leichtere RR-Bedingung vernachlässigt wird. Wie im Diskussionsteil gezeigt werden konnte, sollte für die Begründung einzelner Effekte eine Kombination mehrerer nP-Theorien herangezogen werden, anstatt Erklärungen nur in einer speziellen Theorie zu suchen. Zu beachten ist, dass auch Unterschiede im Studiendesign von Kinder- und Erwachsenenstudien verschiedener hier erwähnter Experimente aus der Literatur und dieser Studie der Grund für die abweichenden Ergebnisse sein könnten. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist zudem durch die unterschiedlich gewählten Altersbereiche sowohl der Kinder als auch der

erwachsenen Probanden nicht uneingeschränkt möglich. Auch die Kinderfreundlichkeit, Gestaltung und die Länge der Aufgaben variierte oft, sodass auch diese Tatsache in die Bewertung der Ergebnisse miteinbezogen werden muss.

Alles in allem bleibt das nP ein Phänomen mit breiter Variabilität. Um weiterführende Erkenntnisse zu erhalten, müssen weitere Untersuchungen an möglichst großen und sinnvoll ausgewählten Kollektiven durchgeführt werden.

4.4 Limitationen

Aus der Auswahl der Probanden, welche eine breite Altersspanne in der Kindergruppe und ungleiche Probandenzahlen beider Gruppen beinhaltete, resultierten bei den Kindern im Vergleich zu den Erwachsenen signifikant höhere RT-Standardabweichungen und höhere RT-V bei den Verhaltensdaten. Durch die fast doppelt so hohe Probandenanzahl der Kinder im Verhältnis zu den Erwachsenen musste die Aussagekraft des t-Tests angezweifelt und das Signifikanzniveau bei den Tests, welche die Effektunterschiede zwischen Erwachsenen und Kindern überprüften, auf $\alpha = 0,01$ angehoben werden, um das konventionelle Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ sicher einzuhalten. Zu beachten ist, dass dadurch die Teststärke vermindert ist. In zukünftigen Studien kann eine derartige Abweichung durch eine engere Auswahl der Altersbereiche und eine annähernd gleiche Teilnehmerzahl der zu vergleichenden Gruppen verhindert werden. Die Untersuchung von Kindern in engeren Altersabschnitten könnte auch zu einer besseren Differenzierung einzelner Effekte und deren Entwicklung führen. Grundsätzlich wäre auch eine generell höhere Teilnehmerzahl erstrebenswert um präzisere und aussagekräftigere Ergebnisse zu gewinnen.

In künftigen Studien könnte der nP-Effekt weiter differenziert werden, indem man die Fehleranzahl im Verlauf des gesamten Tasks untersucht und die Betrachtung von Sequenzeffekten hinzuzieht. So ließe sich feststellen, ob es eventuell zu einer Leistungssteigerung der Probanden im Laufe der Aufgabe kommt. Zu erwarten wäre, dass die Probanden zu Beginn einer Aufgabe mehr Fehler machen. Sobald sie eine für ihren Erfolg sprechende Strategie entwickelt haben und aufgrund der wachsenden Erfahrung immer öfter RC-

Bedingungen erwarten, sollte eine Abnahme ihre Fehlerquote im weiteren Testverlauf zu erkennen sein.

Zudem erscheint es sinnvoll, den genauen Altersbereich, in dem es zur vollendeten Ausprägung der exekutiven Fähigkeiten kommt, näher zu differenzieren und die Priming-Effekte gezielt bei unterschiedlich jungen Kinder- und Jugendgruppen zu untersuchen. Ein einheitliches Studiendesign, welches unter Umständen auch auf zwei verschiedene Altersgruppen wie z.B. Kinder einer klein gehaltenen Altersspanne und Erwachsene in einem definierten Altersbereich zugeschnitten werden könnte, würde eine bessere Interpretation der Studienergebnisse von Kindern und Erwachsenen ermöglichen und für eine Vergleichbarkeit verschiedener Studien untereinander sorgen.

5 Zusammenfassung

Einleitung

Das Phänomen des Primings rückte bereits vor Jahrzehnten in den Fokus von Psychologen und Neurowissenschaftlern in aller Welt, als man erkannte, dass auch unbewusst wahrgenommene Reize Einfluss auf Handlungen im Alltag haben. Es gilt als ein reproduzierbarer Effekt, welcher einer selektiven Informationsauswahl zu Grunde liegt. Wurde die Priorität auf einen für die aktuelle Handlung wichtigen Stimulus der Sinneswahrnehmung gelegt, so kann dieser eine Folgereaktion entweder positiv oder negativ beeinflussen. Zum einen können bereits erlebte Episoden durch die Bildung neuronaler Verknüpfungen bei wiederholtem Auftreten zu einer Erleichterung und Beschleunigung einer Reaktion führen, was als positives Priming (pP) bezeichnet wird. Zum anderen kann solch eine Vorbahnung fehlinterpretiert oder verwechselt werden und zu einer fehlerhaften Reaktion führen, was negatives Priming (nP) genannt wird. Zudem können ablenkende Störreize (Distraktoren), welche einen Zielreiz (Target) begleiten, die Reaktion auf das Target unbewusst negativ oder positiv beeinträchtigen. Im Labor kann das Phänomen am besten anhand von Selektionsaufgaben getestet werden. Die Ursache des Priming-Effekts wird bislang kontrovers diskutiert. Zwei der prominentesten Theorien sind die Inhibitions- und die Wiederabruftheorie. Aber auch alternative Ansätze wie die temporale Diskriminierungstheorie bieten Erklärungsmöglichkeiten. Bisher ist nur wenig über mögliche Unterschiede des Phänomens bei Kindern und Erwachsenen bekannt, obwohl sich bereits viele Forschergruppen damit beschäftigten. Es wird angenommen, dass die für die Entstehung des Effekts wichtigen Hirnstrukturen erst im Laufe der Entwicklung reifen und das Priming erst im Erwachsenenalter vollständig vorzufinden ist.

Fragestellung

Neuronale Aktivitäten, die im menschlichen Gehirn während einer Aufgabenbewältigung stattfinden, können mithilfe Ereignis-korrelierter Potenziale (*event-related potentials*; ERP) im EEG veranschaulicht und untersucht werden. Ca. 80 ms nach einer Falschantwort lässt sich im EEG ein reaktions- bzw. fehlerbezogenes negatives Potenzial Ne (*error-negativity*) beobachten, auf welches nach ca. 200-500 ms ein positives Potenzial Pe (*error-positivity*) folgt. Hinter beiden Po-

tenzialen wird eine entscheidende Rolle bei der Fehlerverarbeitung vermutet. Während bei einigen Studien keine Ne bei Kindern unter 12 Jahren festgestellt werden konnte (Ladouceur et al. 2007), vermuteten andere Forschungsgruppen einen Entwicklungseffekt der Ne schon im jungen Kindesalter (Wiersema et al. 2007; Torpey et al. 2012; Grammer et al. 2014). Neuere Ergebnisse zeigten bei Kindern und Erwachsenen gleichermaßen ausgeprägte Ne und lassen auf ein altersunabhängiges Auftreten des Phänomens schließen (Richardson et al. 2011). Ziel dieser Studie war es daher, weiter zu klären, ob es Unterschiede im Auftreten der antwortbezogenen Potenziale Ne und Pe bei Kindern und Erwachsenen gibt. Zudem sollte untersucht werden, inwiefern Kinder und Erwachsene unterschiedliche Priming-Effekte negativer oder positiver Art während der Aufgabenbewältigung aufweisen. Während sich vergangene Studien eher auf die generelle An- oder Abwesenheit des Effekts bei Kindern und Erwachsenen konzentrierten, sollte diese Studie untersuchen, inwiefern alters- und entwicklungsbedingte Unterschiede im nP-Effekt von Kindern und Erwachsenen vorliegen.

Methode

In dieser Studie wurde eine Variante der Eriksen Flanker Task verwendet. Es konnte eine Gesamtanzahl von 99 Probanden für die Studie gewonnen werden. Davon gehörten 61 Probanden im Alter von 8 bis 15 Jahren der Kindergruppe und 38 Probanden im Alter von 20 bis 32 Jahren der Erwachsenenengruppe an. Während des Tests wurde bei allen Teilnehmern ein EEG abgeleitet, woraus die entsprechenden antwortbezogenen, fehlerspezifischen Ereignis-korrelierten Potenziale ERP's, hier die Ne und Pe, abgeleitet wurden. Der Einfluss von Faktoren wie Interferenzen, Zeit- und Leistungsdruck, Antwort-Wiederholung oder -Wechsel sowie die Kongruenz oder Inkongruenz auf die Leistung der beiden Altersgruppen wurde untersucht. Zur Auswertung der Daten wurde das Statistik-Programm SPSS und das Softwareprogramm Brain Analyser verwendet. Die Verhaltensdaten wurden statistisch anhand von Varianzanalysen mit Messwiederholungen (ANOVA) ausgewertet.

Ergebnisse

Wie erwartet, zeigten die Erwachsenen generell schnellere und bessere Leistungen in der Flanker Task als die Kinder. Zudem wiesen die Kinder eine höhere Reaktionszeitvariabilität auf als die Erwachsenen. Das Priming ergab folgende Effekte: die Kinder wiesen einen stärker

ausgeprägten nP-Effekt auf als die Erwachsenen. Entgegen der Erwartung erzielten beide Probandengruppen bessere und schnellere Leistungen, wenn zwischen zwei aufeinander folgenden Trials (Prime- und Probe-Trial) ein Antwortwechsel (*response change*; RC) gefordert wurde als wenn lediglich mit einer Antwortwiederholung (*response repetition*; RR) zu reagieren war. Beide Gruppen antworteten auf kongruente Trials schneller als auf inkongruente Trials. Altersunabhängig konnte ein altersunabhängiger Gratton-Effekt nachgewiesen werden, welcher sich anhand geringerer Interferenz-Effekte im Probe Trial nach einem vorangegangenen ikr. Prime-Trial äußerte. Beide Probandengruppen zeigten folglich bessere und schnellere Leistungen nach kgr. als nach ikgr. Trials. Bei den fehlerbezogenen Ereignis-korrelierten Potenzialen Ne und Pe zeigte sich, dass Ne bei beiden Altersgruppen gleichermaßen ausgeprägt war, während die Pe der Kinder signifikant höher ausfiel als die der Erwachsenen.

Fazit

Mit der vorliegenden Arbeit können viele wissenschaftliche Studienergebnisse bestätigt werden (Wendelken et al. 2011; Torpey et al. 2012; Tamnes et al. 2012), da die Reaktionszeiten, deren intraindividuelle Variabilität und die Fehlerrate der Erwachsenen deutlich geringer ausfielen als die der Kinder. Viele der genannten Ergebnisse sind wahrscheinlich anhand der Entwicklungsunterschiede beider Gruppen zu erklären.

Kongruente Trials wurden generell schneller und mit weniger Fehlern beantwortet als inkongruente Trials. Dies zeigt, dass auch die als unwichtig eingestuften Reize am Verarbeitungsprozess teilnehmen und eine gewisse Bewusstseinsstufe erreichen müssen. Beide Gruppen zeigten wider Erwarten bei der RC-Bedingung bessere Leistungen als bei RR. Zudem erreichten sie bei der Distraktor-zu-Target-Bedingung bessere Ergebnisse, anstatt einen nP-Effekt aufzuweisen. Faktoren wie Kongruenz, die Erwartungshaltung der Probanden oder Konkordanz-Effekte müssten demnach einen weitaus größeren Einfluss auf das Reaktionsverhalten haben als das Priming.

Es stellte sich heraus, dass sich der Priming-Effekt bei beiden hier untersuchten Gruppen nicht anhand einer bestimmten Theorie begründen lässt. Vielmehr bedarf es der Betrachtung mehrerer Theorien. Generell konnte bei den Kindern ein signifikant größerer nP-Effekt gefunden werden als bei den Erwachsenen, was unter anderem die Studienergebnisse von Frings et al. (2007a) ergänzt. Die in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse zeigen, dass

der nP-Effekt bei Kindern und Erwachsenen nicht nur bereits vorzufinden ist, sondern dass er bei verschiedenen Altersgruppen in unterschiedlicher Ausprägung vorliegt. So führten möglicherweise die längere Lebenserfahrung und der Entwicklungsstand der Probanden zu einer Abnahme des Phänomens.

Die Untersuchung der Ne-Amplitude ergab keine altersbedingten Unterschiede, während die Pe-Amplitude der Kinder signifikant höher ausfiel als die der Erwachsenen. Dies impliziert zum einen, dass die beiden für die Fehlerverarbeitung grundlegenden Faktoren Ne und Pe unterschiedliche Aufgaben einnehmen. Zum anderen zeigt es, dass die Fähigkeit der Verhaltenskontrolle und der Fehlerverarbeitung bereits in jungen Jahren vorhanden ist, aber erst im jungen Erwachsenenalter vollends ausreift.

Weitere Studien könnten hier ansetzen und den Entwicklungsaspekt des Primings und der damit einhergehenden exekutiven Funktionen noch differenzierter beleuchten.

6 Literaturverzeichnis

Albrecht B: Cognitive Control in Attention Deficit / Hyperactivity Disorder. Math.-nat. wiss. Diss. Göttingen 2009

Albrecht B, Brandeis D, Uebel H, Heinrich H, Mueller UC, Hasselhorn M, Steinhausen HC, Rothenberger A, Banaschewski T (2008): Action Monitoring in Boys With Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder, Their Nonaffected Siblings, and Normal Control Subjects: Evidence for an Endophenotype. *Biol Psychiat* 64, 615–625

Alexander WH, Brown JW (2011): Medial prefrontal cortex as an action-outcome predictor. *Nat Neurosci* 14, 1338–1344

Allport A, Wylie G: Task Switching, Stimulus-Response Bindings, and Negative Priming; In: Control of Cognitive Processes; hrsg. v. Monsell S, Driver J. (Attention and Performance XVIII): MIT Press 2000, 35–70

Allport A, Tipper SP, Chmiel N: Perceptual integration and post-categorical filtering; In: Attention and Performance; hrsg. v. Posner MI, Marin O. (XI): Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale NJ London 1985, 107–132

Allport A, Styles EA, Hsieh S: Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks; In: Attention and Performance XV: Conscious and nonconscious information processing; hrsg. v. Umiltà C, Moscovitch M: The MIT Press, Bradford Books. Cambridge MA 1994, 421–452

Baars, B. J., Gage, N. M. (Hrsg.) (2007): Cognition, Brain, and Consciousness, Introduction to cognitive neuroscience; Academic Press 2007

Band GP, Kok A (2000): Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biol Psychol* 51, 201–221

Bartzokis G, Beckson M, Lu PH, Nuechterlein KH, Edwards N, Mintz J (2001): Age-related changes in frontal and temporal lobe volumes in men: a magnetic resonance imaging study. *Arch Gen Psychiat* 58, 461–465

Basar E: Brain function and Oscillations (Springer series in synergetics); Springer, Berlin 1999

-
- Botvinick MM, Braver TS, Barch DM, Carter CS, Cohen JD (2001): Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol Rev* 108, 624–652
- Botvinick MM, Cohen JD, Carter CS (2004): Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn Sci* 8, 539–546
- Braver TS, Cohen JD: On the control of control. The role of dopamine in regulating prefrontal function and working memory; In: *Control of Cognitive Processes*; hrsg. v. Monsell S, Driver J. (Attention and Performance XVIII): MIT Press 2000, 713–737
- Braver TS, Barch DM, Gray JR, Molfese DL, Snyder A (2001): Anterior Cingulate Cortex and Response Conflict: Effects of Frequency, Inhibition and Errors. *Cereb Cortex* 11, 825–836
- Brocki KC, Bohlin G (2004): Executive functions in children aged 6 to 13: a dimensional and developmental study. *Dev Neuropsychol* 26, 571–593
- Brown JW, Braver TS (2005): Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science* 307, 1118–1121
- Bruijn ER de, Hulstijn W, Verkes RJ, Ruigt, Gé. S. F., Sabbe BG (2004): Drug-induced stimulation and suppression of action monitoring in healthy volunteers. *Psychopharmacology* 177, 151–160
- Bruijn ER de, Sabbe BG, Hulstijn W, Ruigt, Gé. S. F., Verkes RJ (2006): Effects of antipsychotic and antidepressant drugs on action monitoring in healthy volunteers. *Brain Res* 1105, 122–129
- Bush G, Luu P, Posner MI (2000): Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends Cogn Sci* 4, 215–222
- Bush G, Whalen PJ, Rosen BR, Jenike MA, McInerney SC, Rauch SL (1998): The counting Stroop: an interference task specialized for functional neuroimaging--validation study with functional MRI. *Hum Brain Mapp* 6, 270–282
- Carter CS, van Veen V (2007): Anterior cingulate cortex and conflict detection: an update of theory and data. *Cogn Affect Behav Ne* 7, 367–379

-
- Casey BJ, Tottenham N, Liston C, Durston S (2005): Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends Cogn Sci* 9, 104–110
- Coles, M., Rugg, M. D. (Hrsg.) (1995): *Electrophysiology of mind: Event related brain potentials and cognition*; Oxford University Press, London 1995
- Coles MG, Gratton G, Bashore TR, Eriksen CW, Donchin E (1985): A psychophysiological investigation of the continuous flow model of human information processing. *J Exp Psychol Human* 11, 529–553
- Coles MG, Scheffers MK, Holroyd CB (2001): Why is there an ERN/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing. *Biol Psychol* 56, 173–189
- Dalrymple-Alford EC, Budayer B (1966): Examination of some aspects of the Stroop Color-Word Test. *Percept Motor Skill* 23, 1211–1214
- Davies PL, Segalowitz SJ, Gavin WJ (2004): Development of response-monitoring ERPs in 7- to 25-year-olds. *Dev Neuropsychol* 25, 355–376
- DeSchepper B, Treisman A (1991): Novel visual shapes in negative priming. *Bull Psychon Soc* 29, 483
- DeSchepper B, Treisman A (1996): Visual memory for novel shapes: implicit coding without attention. *J Exp Psychol Learn* 22, 27–47
- Diamond A, Briand L, Fossella J, Gehlbach L (2004): Genetic and neurochemical modulation of prefrontal cognitive functions in children. *Am J Psychiat* 161, 125–132
- Driver J, Tipper SP (1989): On the nonselectivity of "selective" seeing: Contrasts between interference and priming in selective attention. *J Exp Psychol Human*, 304–314
- Egner T, Ely S, Grinband J (2010): Going, going, gone: characterizing the time-course of congruency sequence effects. *Front Psychol* 1, 154

-
- Eriksen BA, Eriksen CW (1974): Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception Psychophys*, 143–149
- Eriksen CW, Schultz DW (1979): Information processing in visual search a continuous flow conception and experimental results. *Perception Psychophys*, 249–263
- Ernst L.: Latein-Deutsch: Zitate-Lexikon: Quellennachweise; LIT Verlag, Münster 2002
- Falkenstein M: ERP correlates of erroneous performance; In: Errors, conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring (MPI special issue in human cognitive and brain sciences); hrsg. v. Ullsperger M, Falkenstein M: Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften. Leipzig 2004, 5–14
- Falkenstein M, Hohnsbein J, Hoormann J, Blanke L: Effects of errors in choice reactiontasks on the ERP under focused and divided attention; In: Psychophysiological Brain Research; hrsg. v. Brunia CH, Gaillard AW, Kok A: University Press. Tilburg 1990, 192–195
- Falkenstein M, Hoormann J, Christ S, Hohnsbein J (2000): ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biol Psychol* 51, 87–107
- Ferrer E, O'Hare ED, Bunge SA (2009): Fluid reasoning and the developing brain. *Front Neurosci* 3, 46–51
- Ferrer E, Whitaker KJ, Steele JS, Green CT, Wendelken C, Bunge SA (2013): White matter maturation supports the development of reasoning ability through its influence on processing speed. *Dev Sci* 16, 941–951
- Fox E (1994): Interference and negative priming from ignored distractors: the role of selection difficulty. *Perception Psychophys* 56, 565–574
- Fox E (1995): Negative priming from ignored distractors in visual selection: A review. *Psychon B Rev* 2, 145–173
- Frings C, Groh-Bordin C (2007): Electrophysiological correlates of visual identity negative priming. *Brain Res* 1176, 82–91

Frings C, Wühr P (2007): Prime display offset modulates negative priming only for easy-selection tasks. *Mem Cognition* 35, 504–513

Frings C, Feix S, Röthig U, Brüser C, Junge M (2007a): Children do show negative priming: further evidence for early development of an intact selective control mechanism. *Dev Psychol* 43, 1269–1273

Frings C, Rothermund K, Wentura D (2007b): Distractor repetitions retrieve previous responses to targets. *Q J Exp Psychol* 60, 1367–1377

Gamboz N, Russo R, Fox E (2002): Age differences and the identity negative priming effect: an updated meta-analysis. *Psychol Aging* 17, 525–531

Gehring WJ, Fencsik DE (2001): Functions of the medial frontal cortex in the processing of conflict and errors. *J Neurosci* 21, 9430–9437

Gehring WJ, Goss B, Coles MG, Meyer D, Donchin E (1993): A neural system for error detection and compensation. *Psychol Sci*, 385–390

Gentsch A, Ullsperger P, Ullsperger M (2009): Dissociable medial frontal negativities from a common monitoring system for self- and externally caused failure of goal achievement. *Neuroimage* 47, 2023–2030

Gibbons H, Frings C (2010): Flanker negative priming from spatially unpredictable primes: an ERP study. *Int J Psychophysiol* 75, 339–348

Giedd JN, Blumenthal J, Jeffries NO, Castellanos FX, Liu H, Zijdenbos A, Paus T, Evans AC, Rapoport JL (1999): Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nat. Neurosci.* 2, 861–863

Gogtay N, Giedd JN, Lusk L, Hayashi KM, Greenstein D, Vaituzis AC, Nugent TF, Herman DH, Clasen LS, Toga AW et al. (2004): Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *P Natl Acad Sci USA* 101, 8174–8179

Grammer JK, Carrasco M, Gehring WJ, Morrison FJ (2014): Age-related changes in error processing in young children: A school-based investigation. *Dev Cogn Neurosci* 9C, 93–105

Gratton G, Coles M, Donchin E (1983): A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroen Clin Neuro*, 468–484

Gratton G, Coles MG, Donchin E (1992): Optimizing the use of information: strategic control of activation of responses. *J Exp Psychol Gen* 121, 480–506

Hajcak G (2012): What we've learned from mistakes: Insights from error-related brain activity. *Psychol Sci*, 101–106

Hoffmann S, Falkenstein M (2010): Independent component analysis of erroneous and correct responses suggests online response control. *Hum Brain Mapp* 31, 1305–1315

Hogan AM, Vargha-Khadem F, Kirkham FJ, Baldeweg T (2005): Maturation of action monitoring from adolescence to adulthood: an ERP study. *Dev Sci* 8, 525–534

Holroyd CB, Coles M (2002): The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 679–709

Holroyd CB, Nieuwenhuis S, Yeung N, Nystrom L, Mars RB, Coles M, Cohen JD (2004): Dorsal anterior cingulate cortex shows fMRI response to internal and external error signals. *Nat Neurosci* 7, 497–498

Hommel B (1998): Event files: Evidence for automatic integration of stimulus-response episodes. *Vis Cogn*, 183–216

Houghton G, Tipper SP: A model of inhibitory mechanisms in selective attention; In: *Inhibitory process in attention, memory, and language*; hrsg. v. Dagenbach D, Carr TH: Academic Press. San Diego, CA 1994, 53–112

Inzlicht M, Al-Khindi T (2012): ERN and the placebo: a misattribution approach to studying the arousal properties of the error-related negativity. *J Exp Psychol Gen* 141, 799–807

Jasper H (1958): The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroen Clin Neuro*, 371–375

Kail RV, Ferrer E (2007): Processing speed in childhood and adolescence: longitudinal models for examining developmental change. *Child Dev* 78, 1760–1770

Kane MJ, Hasher L, Stoltzfus ER, Zacks RT, Connelly SL (1994): Inhibitory attentional mechanisms and aging. *Psychol Aging* 9, 103–112

Kane MJ, May CP, Hasher L, Rahhal T, Stoltzfus ER (1997): Dual mechanisms of negative priming. *J Exp Psychol Human*, 632–650

Kerns JG, Cohen JD, MacDonald AW, Cho RY, Stenger VA, Carter CS (2004): Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science* 303, 1023–1026

Kim EY, Iwaki N, Imashioya H, Uno H, Fujita T (2007): Error-related negativity in a visual go/no-go task: children vs. adults. *Dev Neuropsychol* 31, 181–191

Konrad K, Neufang S, Thiel CM, Specht K, Hanisch C, Fan J, Herpertz-Dahlmann B, Fink GR (2005): Development of attentional networks: an fMRI study with children and adults. *Neuroimage* 28, 429–439

Ladouceur CD, Dahl RE, Carter CS (2007): Development of action monitoring through adolescence into adulthood: ERP and source localization. *Dev Sci* 10, 874–891

Lambe EK, Krimer LS, Goldman-Rakic PS (2000): Differential Postnatal Development of Catecholamine and Serotonin Inputs to Identified Neurons in Prefrontal Cortex of Rhesus Monkey. *J Neurosci*, 8780–8787

Laurens KR, Ngan, Elton T C, Bates AT, Kiehl KA, Liddle PF (2003): Rostral anterior cingulate cortex dysfunction during error processing in schizophrenia. *Brain* 126, 610–622

Logan GD, Schneider DW (2006): Priming or executive control Associative priming of cue encoding increases switch costs in the explicit task-cuing procedure- *Memory & Cognition*- 2006. *Mem Cognition*, 1250–1259

Lowe DG (1979): Strategies, context and the mechanism of response inhibition. *Mem Cognition*, 382–389

Lowe DG (1985): Further investigations of inhibitory mechanisms in attention. *Mem Cognition* 13, 74–80

Luck SJ: An introduction to the event-related potential technique, Second edition; The MIT Press, Cambridge, London 2005

Lupiáñez J, Rueda, M.R., Ruz, M., Tudela P (2000): Processing of attended and ignored words in the parafovea: inhibitory aspects of semantic processing. *Psicologica*, 233–257

Malmivuo J, Plonsey R: Bioelectromagnetism: Principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields; Oxford Univ. Press, New York (Web Edition: <http://www.bem.fibook/13/13.htm>) 1995

Mattler U (2003): Delayed flanker effects on lateralized readiness potentials. *Exp Brain Res*, 272–288

May CP, Kane MJ, Hasher L (1995): Determinants of Negative Priming. *Psychol Bull*, 35–54

Mayr U, Awh E, Laurey P (2003): Conflict adaptation effects in the absence of executive control. *Nat Neurosci* 6, 450–452

McDowd JM, Oseas-Kreger, D.M., Filion DL: Inhibitory processes in cognition and aging; In: *New perspectives on interference and inhibition in cognition*; hrsg. v. Dempster FK, Brainerd CJ: Academic Press. New York 1995, 363–400

Miller J (1991): The flanker compatibility effect as a function of visual angle, attentional focus, visual transients, and perceptual load: a search for boundary conditions. *Perception Psychophys* 49, 270–288

Milliken B, Joordens S, Merikle PM, Seiffert AE (1998): Selective attention: a reevaluation of the implications of negative priming. *Psychol Rev* 105, 203–229

Milliken B, Tipper SP, Weaver B (1994): Negative priming in a spatial localization task: Feature mismatching and inhibition of distractor location. *J Exp Psychol Human*, 624–646

Moser JS, Schroder HS, Heeter C, Moran TP, Lee Y (2011): Mind your errors: evidence for a neural mechanism linking growth mind-set to adaptive posterror adjustments. *Psychol Sci* 22, 1484–1489

Neill WT (1997): Episodic retrieval in negative priming and repetition priming. *J Exp Psychol Learn*, 1291–3105

Neill WT, Westberry RL (1987): Selective attention and the suppression of cognitive noise. *J Exp Psychol Learn*, 327–334

Neill WT, Valdes LA: Facilitatory and inhibitory aspects of attention; In: *Converging operations in the study of visual selective attention*; hrsg. v. Kramer AF, Coles M, Logan GD: American Psychological Association. Washington, D.C. 1996, 77–106

Neill WT, Lissner LS, Beck JL (1990): Negative priming in same-different matching: further evidence for a central locus of inhibition. *Perception Psychophys* 48, 398–400

Neill WT, Valdes LA, Terry KM, Gorfein DS (1992): Persistence of negative priming: II. Evidence for episodic trace retrieval. *J Exp Psychol Learn* 18, 993–1000

Neill WT, Valdes LA, Terry KM: Selective attention and the inhibitory control of cognition; In: *New perspectives on interference and inhibition in cognition*; hrsg. v. Dempster FK, Brainerd CJ: Academic Press. New York 1995, 207–261

Neumann E, DeSchepper BG (1991): Costs and benefits of target activation and distractor inhibition in selective attention. *J Exp Psychol Learn* 17, 1136–1145

Neumann E, DeSchepper BG (1992): An inhibition-based fan effect: Evidence for an active suppression mechanism in selective attention. *Can J Psychiat*, 1–40

Nieuwenhuis S, Ridderinkhof KR, Blom J, Band GP, Kok A (2001): Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology* 38, 752–760

Nieuwenhuis S, Stins JF, Posthuma D, Polderman T, Boomsma DI, Geus E de (2006): Accounting for sequential trial effects in the flanker task: conflict adaptation or associative priming? *Mem Cognition* 34, 1260–1272

O'Connell RG, Dockree PM, Bellgrove MA, Kelly SP, Hester R, Garavan H, Robertson IH, Foxe JJ (2007): The role of cingulate cortex in the detection of errors with and without awareness: a high-density electrical mapping study. *Eur J Neurosci* 25, 2571–2579

Picton TW, Bentin S, Berg P, Donchin E, Hillyard SA, Johnson R, Miller GA, Ritter W, Ruchkin DS, Rugg MD et al. (2000): Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria. *Psychophysiology* 37, 127–152

Pontifex MB, Scudder MR, Brown ML, O'Leary KC, Wu C, Themanson JR, Hillman CH (2010): On the number of trials necessary for stabilization of error-related brain activity across the life span. *Psychophysiology* 47, 767–773

Pritchard VE, Neumann E (2004): Negative priming effects in children engaged in nonspatial tasks: evidence for early development of an intact inhibitory mechanism. *Dev Psychol* 40, 191–203

Pritchard VE, Neumann E (2009): Avoiding the potential pitfalls of using negative priming tasks in developmental studies: assessing inhibitory control in children, adolescents, and adults. *Dev Psychol* 45, 272–283

Rabbitt PM (1966): Errors and error correction in choice-response tasks. *J Exp Psychol* 71, 264–272

Ramsey PH (1980): Exact Type 1 error rates for robustness of student's t-test with unequal variances. *J Educ Stat*, 331–349

Richardson C, Anderson M, Reid CL, Fox AM (2011): Neural indicators of error processing and intraindividual variability in reaction time in 7 and 9 year-olds. *Dev Psychobiol* 53, 256–265

Rothbart MK, Posner MI: Mechanism and variation in the development of attentional networks; In: Handbook of developmental cognitive neuroscience; hrsg. v. Nelson CA, Luciana M: The MIT Press, Cambridge, London 2001, 353–363

Rothenberger A (2009): Brain oscillations forever- neurophysiology in future research of child psychiatric problems. *J Child Psychol Psyc*, 79–86

Rothermund K, Wentura D, Houwer J (2005): Retrieval of incidental stimulus-response associations as a source of negative priming. *J Exp Psychol Learn* 31, 482–495

Salthouse TA (2005): Relations between cognitive abilities and measures of executive functioning. *Neuropsychology* 19, 532–545

Santesso DL, Segalowitz SJ (2008): Developmental differences in error-related ERPs in middle- to late-adolescent males. *Dev Psychol* 44, 205–217

Santesso DL, Segalowitz SJ, Schmidt LA (2006): Error-related electrocortical responses in 10-year-old children and young adults. *Dev Sci* 9, 473–481

Sattler JM: Assessment of children (Saunders books in psychology), 3rd ed; J. M. Sattler, San Diego Calif 1992

Scheffers MK, Coles MG (2000): Performance monitoring in a confusing world: error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *J Exp Psychol Human* 26, 141–151

Scheffers MK, Coles MG, Bernstein P, Gehring WJ, Donchin E (1996): Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli. *Psychophysiology*, 42–54

Segalowitz SJ, Dywan J (2009): Individual differences and developmental change in the ERN response: implications for models of ACC function. *Psychol Res* 73, 857–870

Segalowitz SJ, Davies PL, Santesso D, Gavin WJ, Schmidt LA: The development of the error negativity in children and adolescents; In: Errors, conflicts, and the brain: current opinions on performance monitoring; hrsg. v. Ullsperger M., Falkenstein M.: MPI of Cognitive Neuroscience. Leipzig 2003

Tamnes CK, Fjell AM, Westlye LT, Østby Y, Walhovd KB (2012): Becoming consistent: developmental reductions in intraindividual variability in reaction time are related to white matter integrity. *J Neurosci* 32, 972–982

Tamnes CK, Walhovd KB, Torstveit M, Sells VT, Fjell AM (2013): Performance monitoring in children and adolescents: a review of developmental changes in the error-related negativity and brain maturation. *Dev Cogn Neurosci* 6, 1–13

Thomason ME, Thompson PM (2011): Diffusion imaging, white matter, and psychopathology. *Annu Rev Clin Psycho* 7, 63–85

Thompson RA, Nelson CA (2001): Developmental science and the media: Early brain development. *American Psychologist* 56, 5–15

Tipper SP (1985): The negative priming effect: inhibitory priming by ignored objects. *Q J Exp Psychol-A* 37, 571–590

Tipper SP (2001): Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? A review and integration of conflicting views. *Q J Exp Psychol-A* 54, 321–343

Tipper SP, Cranston M (1985): Selective attention and priming: Inhibitory and facilitatory effects of ignored primes. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*

Tipper SP, Bourque T, Anderson S, Brehaut JC (1989): Mechanisms of attention: A developmental study. *J Exp Psychol Human*, 492–504

Tipper SP, Brehaut JC, Driver J (1990): Selection of moving and static objects for the control of spatially directed action. *J Exp Psychol Human* 16, 492–504

Toga AW, Thompson PM, Sowell ER (2006): Mapping brain maturation. *Trends Neurosci* 29, 148–159

Torpey DC, Hajcak G, Kim J, Kujawa A, Klein DN (2012): Electrocortical and behavioral measures of response monitoring in young children during a Go/No-Go task. *Dev Psychobiol* 54, 139–150

Uebel H, Albrecht B, Asherson P, Börger NA, Butler L, Chen W, Christiansen H, Heise A, Kuntsi J, Schäfer U et al. (2010): Performance variability, impulsivity errors and the impact of incentives as gender-independent endophenotypes for ADHD. *J Child Psychol Psyc* 51, 210–218

Ullsperger M, Cramon DY von (2001): Subprocesses of performance monitoring: a dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fMRI and ERPs. *Neuroimage* 14, 1387–1401

Ullsperger, M., Falkenstein, M. (Hrsg.) (2004): Errors, conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring (MPI special issue in human cognitive and brain sciences); Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig 2004

Ullsperger M, Bylsma LM, Botvinick MM (2005): The conflict adaptation effect: it's not just priming. *Cogn Affect Behav Ne* 5, 467–472

Ullsperger M, Harsay HA, Wessel JR, Ridderinkhof KR (2010): Conscious perception of errors and its relation to the anterior insula. *Brain Struct Funct* 214, 629–643

van Veen V, Carter CS (2002): The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *J Cogn Neurosci* 14, 593–602

van Veen V, Carter CS (2006): Error detection, correction, and prevention in the brain: a brief review of data and theories. *Clin EEG Neurosci* 37, 330–335

Verhaeghen P, Meersman L de (1998): Aging and the negative priming effect: a meta-analysis. *Psychol Aging* 13, 435–444

Vidal F, Hasbroucq T, Grapperon J, Bonnet M (2000): Is the 'error negativity' specific to errors? *Biol Psychol* 51, 109–128

Vocat R, Pourtois G, Vuilleumier P (2008): Unavoidable errors: a spatio-temporal analysis of time-course and neural sources of evoked potentials associated with error processing in a speeded task. *Neuropsychologia* 46, 2545–2555

-
- Wallesch C, Hommel B, Allport A (2004): Semantic generalization of stimulus-task bindings. *Psychon B Rev* 11, 1027–1033
- Weissman DH, Carp J (2013): Congruency sequence effects are driven by previous-trial congruency, not previous-trial response conflict. *Front Psychol* 4, 587
- Wendelken C, O'Hare ED, Whitaker KJ, Ferrer E, Bunge SA (2011): Increased functional selectivity over development in rostral lateral prefrontal cortex. *J Neurosci* 31, 17260–17268
- Wiersema JR, van der Meere, J. J, Roeyers H (2007): Developmental changes in error monitoring: an event-related potential study. *Neuropsychologia* 45, 1649–1657
- Yee PL (1991): Semantic inhibition of ignored words during a figure classification task. *Q J Exp Psychol-A* 43, 127–153
- Yordanova J, Falkenstein M, Hohnsbein J, Kolev V (2004): Parallel systems of error processing in the brain. *Neuroimage* 22, 590–602
- Zelazo PD, Craik F, Booth L (2004): Executive function across the life span. *Acta Psychol* 115, 167–183

7 Anhang

Anzahl der Sweeps				
Bedingung	Kinder		Erwachsene	
	Mittel	SD	Mittel	SD
RC-SCC	70,34	16,09	77,50	9,80
RC-SIC	58,77	17,82	65,61	12,92
RC-SII	14,07	5,00	13,29	5,59
RR-SCC	66,18	17,28	75,76	9,74
RR-SIC	41,90	16,94	49,53	12,53
RR-SII	27,41	10,53	23,71	7,79

Tab. 1: Anzahl der Sweeps während der Trials.

Auflistung der durchschnittlichen Sweep-Anzahlen unter den einzelnen Bedingungen. Angegeben sind die Mittelwerte (Mittel) und die dazugehörigen Standardabweichungen (SD).

Reaktionszeiten in ms				
Bedingung	Kinder		Erwachsene	
	Mittel	SD	Mittel	SD
Prev.Trial CC-RR-CC	362,35	67,59	329,54	28,15
Prev.Trial CC-RR-IC	502,50	81,79	454,50	50,00
Prev.Trial CC-RC-CC	343,18	76,24	319,22	30,34
Prev.Trial CC-RC-IC	430,55	74,09	412,57	40,48
Prev.Trial IC-RR-CC	388,55	86,60	345,12	33,19
Prev.Trial IC-RR-IC	485,27	81,25	424,51	40,89
Prev.Trial IC-RC-CC	359,09	79,17	336,72	35,64
Prev.Trial IC-RC-IC	443,05	81,15	413,69	41,46

Tab. 2: Auflistung der durchschnittlichen Reaktionszeiten (in ms) bezogen auf die unterschiedlichen Bedingungen.

Es werden die Reaktionszeiten der Kinder und Erwachsenen unter den einzelnen Bedingungen gegenübergestellt. Angegeben sind die Mittelwerte (Mittel) gerundet auf zwei Dezimalstellen und die entsprechenden Standardabweichungen (SD).

Error-negativity (Ne) in μV

ELEKTR.	Beding.	Kinder		Erwachsene	
		Mittel	SD	Mittel	
FZ	RC-SCC	-1,48	2,92	-1,01	1,70
FZ	RC-SIC	-1,80	3,81	-0,76	2,15
FZ	RC-SII	-3,51	4,48	-2,27	2,46
FZ	RR-SCC	-9,80	3,24	-0,18	1,60
FZ	RR-SIC	-1,27	3,63	0,23	2,24
FZ	RR-SII	-4,44	3,99	-2,27	2,25
FCZ	RC-SCC	-0,05	3,74	0,85	2,08
FCZ	RC-SIC	0,96	4,28	1,43	2,92
FCZ	RC-SII	-3,52	4,44	-2,84	2,88
FCZ	RR-SCC	0,29	3,65	1,60	1,90
FCZ	RR-SIC	1,34	4,85	2,04	3,03
FCZ	RR-SII	-4,33	4,60	-3,25	2,77
CZ	RC-SCC	3,25	3,71	3,41	2,43
CZ	RC-SIC	5,50	4,86	4,37	3,45
CZ	RC-SII	0,93	4,85	-1,08	3,80
CZ	RR-SCC	2,99	3,58	3,67	2,33
CZ	RR-SIC	5,55	5,08	4,13	3,40
CZ	RR-SII	1,07	5,14	-1,22	3,50

Tab. 3: Auflistung der Error-negativity (Ne) Grundwerte.

Es werden die durchschnittlichen Ne-Werte an den Elektroden FZ, FCz und CZ für alle Bedingungen bei Kindern und Erwachsenen gezeigt. Angegeben sind die Mittelwerte (Mittel) und die Standardabweichung (SD).

Error-positivity (Pe) in μV

ELEKTR.	Beding.	Kinder		Erwachsene	
		Mittel	SD	Mittel	SD
CZ	RC-SCC	1,67	2,54	0,29	1,60
CZ	RC-SIC	2,13	2,92	0,27	1,70
CZ	RC-SII	9,37	4,99	5,71	4,33
CZ	RR-SCC	0,80	2,61	-0,35	1,46
CZ	RR-SIC	0,76	3,26	-0,14	1,75
CZ	RR-SII	9,93	4,76	5,23	3,22
PZ	RC-SCC	0,47	2,60	-0,41	1,11
PZ	RC-SIC	1,71	2,88	0,16	1,15
PZ	RC-SII	11,23	4,16	6,18	2,57
PZ	RR-SCC	-0,44	2,23	-1,10	1,29
PZ	RR-SIC	0,50	2,86	-0,06	1,19
PZ	RR-SII	10,76	4,36	4,79	2,14

Tab. 4: Auflistung der Error-positivity (Pe) Grundwerte.

Es werden die durchschnittlichen Pe-Werte an den Elektroden Cz und Pz für alle Bedingungen bei Kindern und Erwachsenen gezeigt. Angegeben sind die Mittelwerte (Mittel) und die Standardabweichung (SD).