

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Institut für Neurophysiologie und Pathophysiologie

Direktor:
Prof. Dr. Andreas K. Engel

Modulation von multisensorischer Integration visuell-taktiler Reize durch Kongruenz

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Julia Götz (geb. Diestel)
aus Hamburg

Hamburg 2019

**Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 10.12.2020**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. Andreas K. Engel

Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in: PD Dr. Monika Pötter-Nerger

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
1.1. Multisensorische Integration.....	7
1.1.1. Aufmerksamkeit	13
1.1.2. Kongruenz von multisensorischen Stimuli.....	15
1.1.3. Lokalisation taktiler Stimuli	17
1.2. Ereignis-korrelierte Potentiale (EKP)	19
1.3. Bisherige visuell-taktile Studien.....	21
2. Studie 1: Ereignis-korrelierte-Potentiale vom Abgleich visuell-taktiler Musterpaare	25
2.1. Einleitung	25
2.2. Material und Methoden.....	27
2.2.1. Versuchspersonen	27
2.2.2. Stimulusmaterial und Versuchsaufbau	27
2.2.3. Trainingsablauf.....	29
2.2.4. Versuchsablauf.....	30
2.2.5. Einteilung der Daten	32
2.2.6. Analyse der Verhaltensdaten	33
2.2.7. EEG-Aufzeichnung	33
2.2.8. Vorverarbeitung der EEG-Daten.....	33
2.2.9. Analyse der EEG-Daten.....	35
2.3. Ergebnisse.....	38
2.3.1. Verhaltensdaten.....	38
2.3.2. EEG-Daten	41
2.4. Diskussion.....	55
3. Studie 2: Verhaltensstudie zum Abgleich von bilateralen visuell-taktilen Musterpaaren	68
3.1. Einleitung	68
3.2. Material und Methoden.....	70
3.2.1. Versuchspersonen	70
3.2.2. Stimulusmaterial und Versuchsaufbau	70
3.2.3. Trainingsablauf.....	72
3.2.4. Versuchsablauf.....	73
3.2.5. Datenanalyse.....	74

3.3. Ergebnisse.....	76
3.4. Diskussion.....	79
4. Zusammenfassung.....	85
4.1. Zusammenfassung in Deutsch	85
4.2. Zusammenfassung in Englisch.....	87
5. Abkürzungsverzeichnis	89
6. Literaturverzeichnis.....	91
7. Danksagung.....	110
8. Lebenslauf	111
9. Eidesstattliche Erklärung	113

1. Einleitung

Unsere Welt ist multisensorisch, ständig sind wir Reizen ausgesetzt, die mehrere Sinne gleichzeitig ansprechen können. Unsere Sinnesorgane aber sind unisensorisch, sie können sehen oder hören oder tasten oder schmecken oder riechen. Wie gelangen diese verschiedenen Eindrücke zu der stimmigen Wahrnehmung, die wir von der Welt haben? Wie verarbeitet unser Gehirn multisensorische Reize und ermöglicht es uns fokussiert auf relevante Reize zu reagieren? Und welche Faktoren können multisensorische Integration beeinflussen?

Unser Alltag ist reich an Situationen, in denen uns die Benutzung und Integration der Informationen verschiedener Sinnessysteme weiterhilft. Stellen Sie sich vor, wie Sie am späten Abend vor der Haustür stehen. Die Suche nach dem Schlüssel in Rucksack oder Handtasche gestaltet sich schwierig, da nur eine schwache Beleuchtung vorhanden ist. Doch Sie wissen, wie sich ihr Schlüssel anfühlt. Durch die Kombination von schwachen visuellen Eindrücken und starken taktilen Eindrücken gelingt es Ihnen den Schlüssel zu finden. Dieser Vorgang läuft nicht bewusst oder unter großer Anstrengung ab, sondern scheinbar automatisch und mühelos.

Wie genau die Integration der Informationen verschiedener Sinne abläuft, ist schon länger eine Frage vielfältiger Forschung. Lange Zeit wurde von einem hierarchischen Prozess ausgegangen, der durch die Eigenschaften der Reize bestimmt wird und größtenteils automatisiert in *bottom-up*-Weise (von unten nach oben) abläuft. Mittlerweile ist jedoch bekannt, dass auch kognitive Prozesse wie Aufmerksamkeit als *top-down*-Faktoren (von oben nach unten) Einfluss auf multisensorische Integration haben können. In dieser Arbeit soll das Zusammenspiel von *bottom-up*- und *top-down*-Faktoren näher untersucht werden. Es ist bekannt, dass *bottom-up*-Faktoren wie räumliche und zeitliche Nähe von Informationen verschiedener Sinnessysteme multisensorische Integration verbessern können. Bezüglich anderer Eigenschaften der Stimuli, wie deren Semantik oder Form, gibt es ebenso Hinweise, dass sie die Integration beeinflussen können. Stimmen bestimmte Informationen der Reize überein, so kann dies als Kongruenz bezeichnet werden. Zudem kann durch

top-down-Faktoren wie Aufmerksamkeit die Priorisierung der vorhandenen Reize verändert werden. So können beachtete Reize tiefer gehend verarbeitet werden als unbeachtete.

Um dieses Zusammenspiel näher zu betrachten, wurden visuelle und taktile Punktemuster benutzt. Die Aufgabe sah für die Versuchspersonen vor, nach bestimmten Eigenschaften der Reize zu suchen. In einer bereits fertig gestellten Verhaltensstudie (Göschl, Engel, & Friese, 2014) konnten Effekte durch Kongruenz der visuell-taktilen Punktemuster beobachtet werden. Es wurde entweder ein visuelles oder ein taktiles Muster vorgegeben, welches dann bei der Präsentation von visuell-taktilen Musterpaaren gesucht werden sollte. Hier konnte beobachtet werden, dass die Muster schneller und sicherer gefunden werden konnten, wenn die visuell-taktilen Muster kongruent zueinander waren. In einer weiteren Aufgabe sollte explizit über die Kongruenz der Muster entschieden werden. Die gemessenen Effekte durch Kongruenz waren hier noch größer.

In Studie 1 dieser Arbeit sollten diese Beobachtungen elektrophysiologisch untersucht werden. Dazu wurden gleichzeitig ein taktiles Punktemuster und ein visuelles Punktemuster präsentiert die zwei verschiedenen Aufgaben gemäß untersucht werden sollten. In der **Detektionsaufgabe** sollte ein vorgegebenes Punktemuster in beiden Modalitäten gesucht werden. In der **Kongruenzevaluationsaufgabe** sollte entschieden werden, ob die beiden Muster gleich oder verschieden waren. Aus den gemessenen EEG-Daten wurden Ereignis-korrelierte Potentiale (EKP) berechnet und auf signifikante Unterschiede bei kongruenten und inkongruenten Stimuli sowie bezüglich der Aufgaben untersucht. Anschließend wurde eine Quellenlokalisierung durchgeführt. In Studie 2, in der Verhaltensdaten erhoben wurden, wurden die Stimuli bilateral präsentiert, um so die Modulation von Aufmerksamkeit in einer Umgebung mit relevanten und irrelevanten Stimuli zu untersuchen. Gleichzeitig wurden am linken und am rechten Zeigefinger sowie im linken und im rechten visuellen Hemifeld Muster gezeigt. Durch einen auditorischen Hinweis angegeben sollten die Muster auf der linken oder auf der rechten Seite miteinander verglichen werden und entschieden werden, ob sie gleich oder verschieden waren. Da die Lokalisation der taktilen Stimuli auf einem internen

und einem externen Referenzrahmen beruht, sollte die Aufgabe auch mit überkreuzten Händen durchgeführt werden, um so den Einfluss einer Störung dieser Referenzrahmen auf die Modulation durch Aufmerksamkeit zu betrachten. Die Genauigkeiten und Reaktionszeiten wurden gemessen und auf signifikante Unterschiede hin analysiert. Anzumerken ist, dass in beiden beschriebenen Studien immer beide Modalitäten beachtet werden mussten, um die Aufgaben lösen zu können. Es wurde eine Modulation der EKP und der Verhaltensdaten durch die Aufgabenstellung und die Kongruenz der Stimuli erwartet.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst eine Literaturübersicht zu multisensorischer Integration gegeben (Abschnitt 1.1). Danach folgt eine Übersicht zu den Faktoren, die multisensorische Integration beeinflussen können und in den durchgeführten Studien manipuliert wurden: Aufmerksamkeit (Teilabschnitt 1.1.1), Kongruenz (Teilabschnitt 1.1.2) und taktile Lokalisation (Teilabschnitt 1.1.3). Dann wird die in dieser Arbeit verwendete Technik der EKP (Abschnitt 1.2) und eine Übersicht visuell-taktile Studien mit EKP (Abschnitt 1.3) beschrieben. Im experimentellen Teil werden die durchgeführten Studien ausführlich beschrieben und die Ergebnisse dargestellt und interpretiert (Kapitel 2 und 3). In der Zusammenfassung werden die Ergebnisse resümiert und in die Literatur eingeordnet (Kapitel 4).

1.1. Multisensorische Integration

Werden unisensorische Stimuli zu einem Gesamteindruck vereint, so wird dies als multisensorische Integration bezeichnet. Bei diesem Prozess kann ein Ergebnis entstehen, welches sich von dem einfachen Zusammenfügen der Informationen der unisensorischen Stimuli unterscheidet (Stein, et al., 2010). So konnte bei der invasiven Messung von neuronalen Impulsen an Einzelzellen eine unterschiedliche Feuerrate bei unisensorischen und multisensorischen Stimuli gemessen werden. Hier wurden auditorische und visuelle Stimuli untersucht, welche alleine nur wenige neuronale Impulse in der Zelle erzeugten. Wurden diese Stimuli jedoch zusammen gezeigt, so wurden deutlich mehr Impulse in der Zelle erzeugt (Meredith & Stein, 1983). Neben den Veränderungen auf neuronaler Ebene zeigen sich die

Auswirkungen von multisensorischer Integration in unserem Verhalten, unserer Wahrnehmung und unserer Kognition (Driver & Spence, 2000; Stein & Meredith, 1993; Stein, 2012). Dies kann auf der Verhaltensebene gemessen werden. Hier kann multisensorische Integration zu schnelleren Reaktionszeiten, besseren Detektionsraten und besserer Unterscheidung von Stimuli führen (Frassinetti, Bolognini, & Làdavas, 2002; Lovelace, Stein, & Wallace, 2003; Rach, Diederich, & Colonius, 2011).

Eine Reihe von multisensorischen Illusionen zeigt eindrucksvoll, wie die Stimuli verschiedener Modalitäten zu einem Gesamteindruck vereint und sogar verändert werden. Ein klassisches Beispiel ist die *McGurk-Illusion*. Für diese Illusion wurden visuell Lippenbewegungen gezeigt, zum Beispiel für den Laut „ga“. Auditorisch wurde ein Laut, in diesem Fall „ba“ präsentiert. Die Informationen der auditorischen und visuellen Stimuli wurden dann als der Laut „da“ wahrgenommen (McGurk & MacDonald, 1976). Ein weiteres bekanntes Beispiel für eine solche Illusion ist die *visuelle Blitz-Illusion (visual flash illusion)*. Hier wurde visuell sehr kurz ein Reiz gezeigt, wie ein weißer Kreis für 50 ms, der als Blitz bezeichnet wurde. Gleichzeitig wurden schnell hintereinander mehrere Pieptöne abgespielt. Dann wurden statt einem Blitz mehrere Blitze wahrgenommen (Shams, Kamitani, & Shimojo, 2000). Auch der *Bauchredner-Effekt (ventriloquist effect)* zeigt die Integration multisensorischer Reize. Die Sprache des Bauchredners wird durch die dazu passenden Mundbewegungen der Puppe als von der Puppe ausgehend wahrgenommen (Vroomen & de Gelder, 2004). Unsere Wahrnehmung kann also durch die uns umgebenden multisensorischen Stimuli beeinflusst und sogar verändert werden.

Die Frage wie unser Nervensystem die Stimuli verschiedener Sinne vereint, ist schon seit längerer Zeit Gegenstand neurowissenschaftlicher Forschung. Urbantschitsch versuchte bereits 1888 zu untersuchen, ob Wechselwirkungen zwischen den Sinnen physiologisch vorkommen würden (Urbantschitsch, 1888). In weiterer Folge entwickelte sich ein Modell zum Ablauf multisensorischer Integration, welches hierarchisch war. Nach der Verarbeitung der Stimuli in den primär- und sekundärsensorischen Arealen sollten die Informationen auf höherer Ebene

miteinander vereint werden. Areale höherer Ebene können Assoziationscortices oder subkortikale Areale sein. Diese wurden als multisensorische Regionen bezeichnet, wenn sich eine Reaktion auf die Reizung unterschiedlicher Sinne oder auf die Kombination von Stimuli verschiedener Sinne zeigte. Hier konnte die eigentliche multisensorische Integration stattfinden. Als bedeutende multisensorische Regionen konnten der Sulcus temporalis superior (STS), der Sulcus intraparietalis (IPS), Bereiche des Frontallappens, die Insula und das Claustrum identifiziert werden (Avillac, Ben Hamed, & Duhamel, 2007; Barraclough, Xiao, Baker, Oram, & Perrett, 2005; Benevento, Fallon, Davis, & Rezak, 1977; Calvert, 2001; Ghazanfar & Schroeder, 2006; Graziano, Reiss, & Gross, 1999; Graziano, Yap, & Gross, 1994; Hyvärinen & Shelepin, 1979; Kayser & Logothetis, 2007; Schlack, Sterbing-D'Angelo, Hartung, Hoffmann, & Bremmer, 2005).

Als bestimmend für multisensorische Integration wurden die Eigenschaften der Stimuli angesehen, wie die zeitliche oder räumliche Ausrichtung der Stimuli oder ihre Form und Bedeutung (Semantik). Von unten nach oben konnte die Integration durch diese Eigenschaften gelenkt werden. Dies wird auch als *bottom-up*-Mechanismus bezeichnet. Dem Beispiel der multisensorischen Illusionen folgend wurde der Prozess der multisensorischen Integration als ein automatisch ablaufender Vorgang angesehen (Felleman & Van Essen, 1991; Foxe & Schroeder, 2005, Jones & Powell, 1970; Meredith, 2002; Stein & Meredith, 1993). Nachweise für Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen sensorischen Systemen auf primär- oder sekundärsensorischer Ebene waren gering. Es sollte jedoch angemerkt werden, dass auch zu dieser Zeit bereits Studien vorlagen, die Hinweise für multisensorische Integration auf früheren Ebenen vorlegten. So konnte der Eingang von auditorischen und somatosensorischen Informationen in den primär visuellen Kortex von Katzen gefunden werden (Murata, Cramer, & Bach-y-Rita, 1965). Dies weist darauf hin, dass auch auf früheren Ebenen, wie primärsensorischen Arealen, eine Verbindung zwischen den verschiedenen Sinnessystemen bestehen kann und sich hier die Möglichkeit zu multisensorischer Integration eröffnet.

Besonders hervor zu heben als multisensorische Region ist der Colliculus superior, da hier Prinzipien der multisensorischen Integration besonders gut untersucht

wurden. Der Colliculus superior liegt im oberen Teil des Mittelhirndachs (*tectum mesencephali*). Diese Region enthält unimodale, bimodale und trimodale Neuronen und erhält Informationen aus dem visuellen, taktilen und dem auditorischen System. Initiierung und Kontrolle von Aufmerksamkeit und Orientierung werden vom Colliculus superior beeinflusst (Stein & Meredith, 1993). Durch Einzellableitungen in dieser Region konnten einige kennzeichnende Prinzipien der multisensorischen Integration beschrieben werden. Die *räumliche Regel* (*spatial rule*) besagt, dass multisensorische Integration dann am stärksten ist, wenn die Reize in räumlicher Nähe auftreten, beziehungsweise die gleichen rezeptiven Felder stimulieren (King & Palmer, 1985; Meredith & Stein, 1986; für eine Diskussion siehe Spence, 2013). Mit der *zeitlichen Regel* (*temporal rule*) wird beschrieben, dass multisensorische Integration am größten ist bei zeitlich nah beieinander auftretenden Stimuli (Gillmeister & Eimer, 2007; Meredith, Nemitz, & Stein, 1987). Unter dem Prinzip der *Antwortverstärkung* (*response enhancement*) wird verstanden, dass Stimuli, die alleine eine schwache oder gar keine neuronale Antwort erzeugen, zusammen eine deutlich verstärkte Antwort erzeugen können (Meredith & Stein, 1983). Genauso können Stimuli, die alleine eine starke Antwort erzeugen, zusammen eine abgeschwächte Antwort erzeugen, was als *Antwortabschwächung* (*response depression*) bezeichnet wird (Meredith & Stein, 1983). Des Weiteren gibt es das Prinzip der inversen Effektivität (*inverse effectiveness*). Dieses Prinzip bezieht sich auf die Tendenz eines Stimulus, eine Antwort hervorzurufen. Bei multisensorischen Stimuli verhält sich die hervorgerufene Antwort invers zu der größten Antwort, die durch einen der unisensorischen Stimuli alleine hervorgerufen werden könnte. So können unisensorische Stimuli mit einer geringen Antworttendenz als multisensorische Stimuli eine deutlich stärkere Antwort hervor rufen und umgekehrt (Holmes, 2009; Stein & Meredith, 1993). Diese Prinzipien wurden anhand von Einzellmessungen in anästhesierten Katzen beschrieben. Interessant ist, dass diese Prinzipien auch bei anderen Methoden und bei der Untersuchung von anderen Spezies und von wachen Menschen wiederholt gezeigt werden konnten (Buchholz, Goonetilleke, Medendorp, & Corneil, 2012; Calvert, 2001; Laurienti, Perrault, Stanford, Wallace, & Stein, 2005).

Das Modell zur Funktionsweise von multisensorischer Integration wurde in letzter Zeit bedeutend erweitert. Es gibt immer mehr Nachweise, dass bislang als unisensorisch angesehene Regionen Eingang von Informationen anderer Sinne erhalten können. So konnten in der auditorischen Gürtel-Region (*auditory belt area*) Signale gemessen werden, die durch taktile oder visuelle Reize hervorgerufen wurden (Kayser, Petkov, Augath, & Logothetis, 2005; King & Walker, 2012). Visuell evozierte Potentiale (VEP) zeigten eine Modulation früherer Komponenten durch Pieptöne (Shams, Kamitani, Thompson, & Shimojo, 2001). Auch die Aktivität im primären und sekundären somatosensorischen Kortex konnte durch visuelle Stimuli verändert werden (Taylor-Clarke, Kennett, & Haggard, 2002). Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Sinne schon auf primär sensorischer Ebene stattfinden kann und das Modell zur Funktionsweise von multisensorischer Integration komplexer ist als in frühen Arbeiten angenommen (Foxe & Schroeder, 2005; Ghazanfar & Schroeder, 2006; Kayser & Logothetis, 2007; Macaluso, Frith, & Driver, 2002; Schroeder & Foxe, 2005). Eine wichtige Rolle spielen zudem *top-down*-Einflüsse, die multisensorische Integration modulieren können. In der Hierarchie der Reizverarbeitung höher gelegene Areale zeigen Feedback-Verbindungen zu primär sensorischen Arealen. Dadurch können Prozesse in höher gelegenen Arealen wie Aufmerksamkeit Einfluss auf multisensorische Integration in primär sensorischen Arealen nehmen (Driver & Spence, 2000; Macaluso & Driver, 2005; Talsma, Senkowski, Soto-Faraco, & Woldorff, 2010). Eine noch offene Frage ist, ob multisensorische Integration auch direkt in den primär sensorischen Arealen beginnen kann. Bezüglich des primären visuellen Kortex scheint diese Frage geklärt und eine multisensorische Funktion dieser Region gezeigt werden (Murray, Thelen, Thut, Romei, Martuzzi, & Matusz, 2016).

Anatomische Verbindungen zwischen den an multisensorischer Integration beteiligten Arealen sind ein Weg der Informationsvermittlung. Darüber hinaus wurden synchrone Feuerraten der Neurone als ein weiterer Weg identifiziert, um multisensorische Integration zu vermitteln. Senkowski et al. stellen diese Hypothese ausführlich in einer Übersichtsarbeit dar (Senkowski, Schneider, Foxe, & Engel, 2008). Die Feuerraten der Neurone sind als Oszillationen messbar und werden in fünf Frequenzbänder eingeteilt. Im Delta-Band liegen Frequenzen von 0,5 bis 3,5 Hz,

im Theta-Band von 4 bis 7 Hz, im Alpha-Band von 8 bis 12 Hz, im Beta-Band von 13 bis 30 Hz und im Gamma-Band von über 30 Hz. Die Oszillationen verschiedener Hirnareale können durch ein externes Ereignis an Signalstärke (*oscillatory power*) gewinnen. Zudem kann sich die Phase der Oszillationen verändern und zurückgesetzt werden (*phase resetting*), mit einem Ereignis gekoppelt sein (*phase locking*), in einem bestimmten Verhältnis mit der Phase eines anderen Signal stehen (*phase coherence*) oder genau der Phase eines anderen Signal entsprechen (*phase synchrony*). Diese Mechanismen ermöglichen flexible Verbindungen zwischen Hirnarealen und können so für die Integration multisensorischer Informationen sorgen. In einer aktuellen Übersichtsarbeit fassen Keil und Senkowski (2018) Studien zu multisensorischer Integration und Oszillationen zusammen. *Bottom-up*-Prozesse bei multisensorischer Integration scheinen sich vorwiegend im Beta- und Gamma-Band zu zeigen. *Top-down*-Prozesse hingegen zeigen sich eher im Alpha- und Beta-Band. Insgesamt ergibt sich das Bild eines komplexen Netzwerkes, in dem primär sensorische Areale und höher gelegene Areale dynamisch miteinander in Verbindung treten.

Die Berechnung virtueller Modelle sind ein weiterer Ansatz zur Erforschung multisensorischer Integration. Mittels Verhaltensdaten können Modelle simuliert werden, mit deren Hilfe die zugrunde liegenden statistischen Prinzipien multisensorischer Integration ermittelt werden können. So scheint die Integration verschiedener Sinnesinformationen in statistisch optimaler Weise zu erfolgen (Alais & Burr, 2004; Ernst & Banks, 2002). Die Informationen der verschiedenen Sinne erlauben unterschiedliche Abschätzungen der Umwelt und scheinen zu einer multisensorischen Bewertung vereint zu werden, die eine größere Reliabilität hat (Ernst & Bühlhoff, 2004).

Letztlich wird deutlich, dass nach der Entwicklung des Modells multisensorischer Integration von einem einfachen hierarchischen zu einem Modell mit immer mehr Verbindungen zwischen den benannten Ebenen, noch weitere Entwicklungen zu einem erheblich komplexeren Modell zu erwarten sind. Unser Verständnis von multisensorischer Integration wird durch weitere Forschung ausgeweitet werden müssen, um dieses komplexe System zu verstehen. Dadurch bietet sich außerdem

die Möglichkeit, wertvolle Hinweise zum Verständnis von Krankheiten zu erlangen. Bei Schizophrenie scheint zum Beispiel die Fähigkeit zu multisensorischer Integration eingeschränkt, so dass bessere Kenntnisse dieser Mechanismen hier neue Möglichkeiten zur Früherkennung und Verzögerung des Erkrankungsbeginns bieten könnten (Tseng, Bossong, Modinos, Chen, McGuire, & Allen, 2015).

In dieser Arbeit soll das Zusammenspiel von Aufmerksamkeit, Kongruenz und multisensorischer Integration untersucht werden, daher wird im folgenden Teilabschnitt auf die bereits angesprochene Rolle von Aufmerksamkeit näher eingegangen. Als Faktoren, die Aufmerksamkeit modulieren können, sollen anschließend Kongruenz und Prozesse der Lokalisation taktiler Stimuli näher beschrieben werden. Abgeschlossen wird mit Erläuterungen zu der in Studie 1 verwendeten Technik der EKP sowie Studien, die diese Technik in einem visuell-taktilen Paradigma angewandt haben.

1.1.1. Aufmerksamkeit

Aufmerksamkeit ist ein kognitives Konzept, welches die Auswahl bestimmter Reize, Objekte, Gedanken und Aktionen zur weiteren Bearbeitung steuern soll (Pashler, 1999). Die begrenzt vorhandenen Ressourcen sollen auf für das Verhalten relevante Stimuli gelenkt werden (Broadbent, 1958; Desimone & Duncan, 1995). Somit ergeben sich auch Einflüsse von Aufmerksamkeit auf multisensorische Integration (Macaluso, Frith, & Driver, 2000; Macaluso, Noppeney, Talsma, Vercillo, Hartcher-O'Brien, & Adam, 2016; Talsma, Doty, & Woldorff, 2007). Die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Aufmerksamkeit und multisensorischer Integration wurden in einer Übersichtsarbeit ausführlich dargestellt (Tang, Wu, & Shen, 2016). In dieser Arbeit wurden endogene und exogene Aufmerksamkeit unterschieden, welche im Folgenden als *top-down*- und *bottom-up*-Aufmerksamkeit bezeichnet werden. Nach Tang et. al kann Aufmerksamkeit in verschiedenen Weisen mit multisensorischer Integration interagieren. Aufmerksamkeit kann in *bottom-up*-Weise durch einen Stimulus erregt werden, der zum Beispiel unregelmäßig auftritt und deshalb hervorsteht. Auf diesen Stimulus gerichtete Aufmerksamkeit kann sich auf

zur gleichen Zeit oder in räumlicher Nähe auftretende Stimuli ausbreiten. So werden diese Stimuli stärker verarbeitet und multisensorische Integration kann gefördert werden (Van der Burg, Olivers, Bronkhorst, & Theeuwes, 2008). Zudem kann es auch erst durch die multisensorische Integration von Stimuli zu erhöhter Salienz der Stimuli und so zur Lenkung der Aufmerksamkeit auf die Reizkombination kommen (Matusz & Eimer, 2011). Genauso kann Aufmerksamkeit in *top-down*-Weise die Auswahl von Stimuli zur multisensorischen Integration beeinflussen (Talsma, Senkowski, Soto-Faraco, & Woldorff, 2010). Die Aufgabe in einem Experiment kann beispielsweise sein, die Aufmerksamkeit in *top-down*-Weise auf ein bestimmtes Ereignis oder eine räumliche Orientierung zu fokussieren. Besonders in Umgebungen mit zahlreichen Stimuli müssen die vorhandenen Ressourcen zur Verarbeitung gelenkt werden, so dass relevante Stimuli verstärkt verarbeitet werden können (Posner & Driver, 1992). Insgesamt kann durch Aufmerksamkeitszuwendung multisensorische Integration gefördert oder gehemmt werden (Fairhall & Macaluso, 2009; Mozolic, Hugenschmidt, Peiffer, & Laurienti, 2008; Senkowski, Talsma, Herrmann, & Woldorff, 2005). Einige Studien konnten auch beobachten, dass multisensorische Integration unabhängig von Aufmerksamkeit und somit automatisch geschehen kann (Bertelson, Vroomen, de Gelder, & Driver, 2000).

Tang et. al (2016) fassen auch die Erkenntnisse zu Aufmerksamkeitsnetzwerken zusammen. Ein in dorsalen Hirnarealen gelegenes Netzwerk scheint besonders an der Vermittlung von *top-down* beziehungsweise endogener Aufmerksamkeit beteiligt zu sein. Das dorsale Aufmerksamkeitsnetzwerk besteht aus dem Lobus parietalis superior (SPL), dem Sulcus intraparietalis (ITS) und dem frontalen Augenfeld (FEF). *Bottom-up* beziehungsweise exogene Aufmerksamkeit dagegen scheint eher über ein ventrales Netzwerk vermittelt zu werden. Das ventrale Aufmerksamkeitsnetzwerk besteht vorwiegend aus Arealen der rechten Hemisphäre und bezieht den temporo-parietalen Übergang (TPJ), den präfrontalen Kortex (VFC) und Gyrus frontalis medius (MFG) mit ein.

Hervorzuheben ist, dass in Studie 1 und 2 immer visuelle und taktile Stimuli gleichzeitig beachtet werden mussten. In Studie 1 gab es keine direkte Manipulation der Aufmerksamkeit. Hier sollte in der **Detektionsaufgabe** nach einem *Target*

gesucht werden, so dass eine Lenkung der Aufmerksamkeit in *bottom-up*-Weise durch *Targets* möglich gewesen wäre. In der **Kongruenzevaluationsaufgabe** sollte nach Kongruenz gesucht werden. In Studie 2 sollte die räumliche Aufmerksamkeit beeinflusst werden. Die Stimuli sollten auf der linken oder rechten Körperseite beachtet werden. So konnte ein möglicher Einfluss der beachteten und unbeachteten Stimuli, welche kongruent oder inkongruent sein konnten, betrachtet werden.

1.1.2. Kongruenz von multisensorischen Stimuli

Unter Kongruenz ist im Kontext der multisensorischen Integration eine Übereinstimmung von bestimmten Stimulusmerkmalen zu verstehen, die für die Verarbeitung förderlich sein kann. Neben der bereits beschriebenen räumlichen oder zeitlichen Übereinstimmung können auch die physikalischen Eigenschaften, die Semantik oder Form der Stimuli Kongruenz erzeugen und so multisensorische Integration modulieren. Stimuli mit gleicher Semantik können in verschiedenen Modalitäten als kongruent empfunden werden und zu schnelleren Reaktionszeiten und besseren Detektionsraten führen. Dies konnte zum Beispiel bei einem visuell-auditorischen Paradigma gezeigt werden. Es wurden Bilder von Tieren und die entsprechenden Tiergeräusche präsentiert. In einer Reihe von uni- und bimodalen Stimuli sollte nach einem vorgegebenen Tier gesucht werden. Bei zueinander passenden, also kongruenten Bildern und Geräuschen, waren die Reaktionszeiten und Detektionsraten besser (Molholm, Ritter, Javitt, & Foxe, 2004). Bei einem weiteren visuell-auditorischen Paradigma wurden blaue oder rote Kreise und auditorisch die Worte „blau“ und „rot“ gezeigt. Diese Stimuli wurden uni- oder bimodal präsentiert, wobei andere Antworteingaben bei blauen oder roten Stimuli gemacht werden sollten. Auch hier waren die Reaktionszeiten und Detektionsraten für kongruente visuell-auditorische Stimuli besser (Laurienti, Kraft, Maldjian, Burdette, & Wallace, 2004). Auch für taktile und auditorische Stimuli konnten solche Kongruenzeffekte gezeigt werden. Als taktile Stimuli sollten Objekte abgetastet werden. Auditorische Stimuli waren die Geräusche dieser Objekte. Der auditorische Stimulus wurde gezeigt, nachdem das Objekt abgetastet war und konnte kongruent oder inkongruent sein. Neben Kongruenzeffekten in den Verhaltensdaten konnten

Effekte in den EKP und der Signalstärke des Gamma-Bands gefunden werden (Schneider, Lorenz, Senkowski, & Engel, 2011).

Die beschriebenen Übereinstimmungen zwischen Stimuli werden auch als crossmodale Korrespondenzen (*crossmodal correspondence*; Spence, 2011) bezeichnet. Sie sind nicht direkt aus den Eigenschaften der Stimuli abzuleiten und scheinen eher durch Lernprozesse zu entstehen. Andere Wege um Kongruenz zwischen Reizen zu erzeugen beziehen sich auf grundlegende Eigenschaften der Stimuli, die von vielen Menschen als zusammenpassend empfunden werden. Diese Eigenschaften können meistens nur in jeweils einer Modalität erfasst werden. Von einigen Autoren wird diese Art der Kongruenz als verwandt zur Synästhesie beschrieben (Spence, 2011). Hierunter fällt zum Beispiel die Beschreibung von Kongruenz zwischen hohen Tönen und hellen glänzenden Oberflächen (Marks, 1974). In einer Studie von Walker et al. (2010) konnte auch gezeigt werden, dass dunkle Objekte als schwerer eingeschätzt werden als helle Objekte. Wurden diese Objekte dann in der Hand gewogen, so erscheinen dunkle Objekte leichter. Insgesamt zeigen diese Beispiele, dass es neben der zeitlichen und räumlichen Übereinstimmung zwischen den Stimuli verschiedener Modalitäten noch weitere Eigenschaften gibt, die Kongruenz und dadurch verbesserte multisensorische Integration erzeugen können.

Die in Studie 1 und 2 dieser Arbeit verwendeten Stimuli sind visuelle und taktile Muster aus Punkten, die in ihrer Anordnung und äußeren räumlichen Form übereinstimmen können. Diese Art der Kongruenz, die mit dem Sehen und Tasten eines Schlüssels vergleichbar ist, fällt nicht unter eine der zuvor beschriebenen Arten der Kongruenz, sondern untersucht einen anderen speziellen Aspekt, der multisensorische Integration fördern kann. In Studie 1 konnte es in der **Detektionsaufgabe** nicht-aufgabenrelevante Kongruenz geben, da hier zur Durchführung der Aufgabe Kongruenz nicht beachtet werden musste. In der **Kongruenzevaluationsaufgabe** war Kongruenz aufgabenrelevant, da entschieden werden musste, ob die präsentierten Muster kongruent waren oder nicht. In Studie 2 konnte es beachtete und nicht-beachtete Kongruenz durch Manipulation der räumlichen Aufmerksamkeit geben.

1.1.3. Lokalisation taktiler Stimuli

Spüren wir eine Berührung an der Hand, so müssen wir den taktilen Reiz lokalisieren um auf ihn reagieren zu können. Dazu müssen wir wissen, welcher Teil der Hand berührt wurde und wo sich unsere Hand befindet, denn nicht immer ist unsere Hand auch auf der zugehörigen Körperseite. Um taktile Stimuli zu lokalisieren, können sie in einen internen und in einen externen Referenzrahmen eingeordnet werden. Der interne Referenzrahmen beruht auf anatomischen Grundlagen und der Abbildung einer Berührung auf einem bestimmten Abschnitt der Haut in einer bestimmten Region des somatosensorischen Kortex (Penfield & Boldrey, 1937). Eine Einordnung in den externen Referenzrahmen beruht auf der Lokalisation des taktilen Stimulus im Raum, die abhängig von der Position des berührten Körperteils ist (Pouget, Ducom, Torri, & Bavelier, Multisensory spatial representations in eye-centered coordinates for reaching, 2002). Die Informationen des anatomischen Referenzrahmens werden in den externen Referenzrahmen übertragen, was als *remapping* bezeichnet wird (englisch für Wiederkartierung), sowie um räumliche Hinweise aus anderen Modalitäten ergänzt (Driver & Spence, 1998). Allerdings ist noch unklar, wie genau die verschiedenen Referenzrahmen miteinander vereint werden und welche Prozesse Einfluss darauf haben können.

Ein Ansatz zur Untersuchung des *remappings* ist das Überkreuzen der Hände. Dadurch werden die Stimuli weiterhin an gleicher Stelle im somatosensorischen Kortex abgebildet. Es verändert sich jedoch die räumliche Lokalisation der Hand im Raum, so dass es zu einem Konflikt zwischen dem internen und externen Referenzrahmen kommt. Dies kann sich an veränderten Leistungen in bestimmten Aufgaben zeigen. Bei der Aufgabe zur Beurteilung der zeitlichen Reihenfolge (*temporal order judgement*, TOJ) soll die zeitliche Reihenfolge zweier nacheinander an jeweils einer Hand gezeigter Stimuli beurteilt werden. Mit überkreuzten Händen wird der zur Unterscheidung erforderliche Zeitraum zwischen den beiden Stimuli deutlich länger (Shore, Spry, & Spence, 2002; Yamamoto & Kitazawa, 2001). Da hier eine zeitliche Bewertung der Stimuli erforderlich ist, die ohne die externen räumlichen

Informationen möglich ist, weisen Ergebnisse aus Studien mit der TOJ-Aufgabe auf eine automatische Einordnung der taktilen Stimuli in den externen Referenzrahmen hin (Heed & Azañón, 2014). Es kann jedoch nicht von einem voll automatischen *remapping*-Prozess ausgegangen werden, da *top-down*-Einflüsse durch die Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses gezeigt werden konnten. Muss nicht nur die zeitliche Reihenfolge der taktilen Stimuli beurteilt werden, sondern noch eine zusätzliche Aufgabe erledigt werden, so zeigte sich ein geringerer Effekt durch überkreuzte Hände (Badde, Heed, & Röder, 2014). Dies wurde als Hinweis gewertet, dass der Beginn des *remappings* automatisch ablaufen kann, jedoch die letztendliche Verbindung der internen und externen Informationen einer *top-down*-Kontrolle unterliegt. Bei hoher Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses kann es zu einem geringeren Einfluss des externen Referenzrahmens und somit auch zu einem geringeren Konflikt durch überkreuzte Hände kommen. Insgesamt scheint die Lokalisation taktiler Stimuli auf einer flexiblen Gewichtung der verschiedenen Referenzrahmen zu beruhen, die durch Faktoren wie Aufgabenstellung, visuelle Information und Bewegung beeinflusst werden kann (Badde & Heed, 2016).

Viele der erwähnten Studien fordern eine Antwort, die auf räumlichen Bezügen basiert. So musste zum Beispiel bewertet werden, ob ein Stimulus zuerst an der linken oder an der rechten Hand zu spüren war oder die linke oder rechte Hand soll einen Knopf zur Antwort drücken. Nur wenige Studien hingegen haben untersucht, welchen Effekt gekreuzte Hände bei Aufgaben haben, die keine räumlich bezogene Antwort erfordern (Holmes, Sanabria, Calvert, & Spence, 2006). Darüber hinaus gibt es nur wenige Arbeiten, die eine Bewertung multisensorischer Stimuli mit gekreuzten Händen untersuchten (Buchholz, Goonetilleke, Medendorp, & Corneil, 2012). Daher sollte in Studie 2 eine Bewertung von visuell-taktilen Stimuli ohne eine räumlich definierte Antwort untersucht werden. So sollte geprüft werden, ob multisensorische Kongruenzeffekte auch mit gekreuzten Händen auftreten können und in welchem Maße sie durch die Störung des internen und externen Referenzrahmens beeinflusst werden.

1.2. Ereignis-korrelierte Potentiale (EKP)

Seit der Entdeckung des Elektroenzephalogramms (EEG) durch Berger (Berger, 1929) hat sich diese Technik zu einer angesehenen Methode der Neurowissenschaften entwickelt. Mit dem EEG lassen sich Potentialdifferenzen an der Kopfoberfläche messen, die zum größten Teil durch postsynaptische Potentiale (PSP) zustande kommen. Hauptanteil an den PSP haben die Pyramidenzellen des Kortex. Treten an einer Vielzahl gleich orientierter Pyramidenzellen gleichzeitig postsynaptische Potentiale auf, so lässt sich diese Potentialänderung auf Millisekunden genau messen (Buzsáki, Anastassiou, & Koch, 2012). Die hohe zeitliche Auflösung, die nicht-invasive Messung der Gehirnaktivität wacher Menschen und die niedrigen Kosten zeichnen das EEG aus.

Eine Methode, um aus dem komplexen, an der Kopfoberfläche gemessenen Signal jene Anteile zu extrahieren, die mit sensorischen, motorischen oder kognitiven Prozessen zusammenhängen, ist das sogenannte Ereignis-korrelierte Potential (EKP). Ein Ereignis kann zum Beispiel die Präsentation eines Stimulus sein. Durch Mittelung aller auf den Stimulus folgenden EEG-Signale können die mit dem Stimulus verbundenen Potentialdifferenzen von der Spontanaktivität getrennt werden. Prozesse durch die Verarbeitung des Stimulus, durch Beachtung und Nicht-Beachtung eines Stimulus, durch kognitive Prozesse in Verbindung mit der Aufgabenstellung, durch Antwortvorbereitung, motorische Antworteingabe und Antwortunterdrückung können in das EKP mit einfließen. Das EKP wird dargestellt als eine Wellenform von Potentialdifferenzen, die anhand charakteristischer Hebungen und Senkungen, sogenannter Komponenten, beschrieben werden kann. Diese Komponenten werden mit verschiedenen kognitiven Prozessen in Verbindung gebracht. Dabei wird üblicherweise eine Benennung anhand ihres zeitlichen Auftretens und ihrer Polarität vorgenommen. Mit einem „P“ werden positive Maxima der Wellenform bezeichnet, mit einem „N“ negative. Dann erfolgt eine Nummerierung der positiven beziehungsweise negativen Maxima (Luck, 2014). Ein Großteil der EKP-Studien hat visuelle und auditorische Stimuli untersucht. In der folgenden Darstellung werden einige wichtige Komponenten kurz beschrieben, wobei ausschließlich Bezug auf visuelle Komponenten genommen wird (Abb. 1).

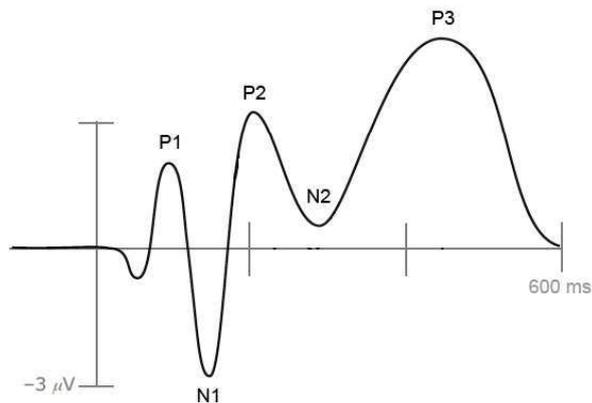


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Ereignis-korrelierten-Potentials bei visueller Stimulation

Schema der Komponenten eines Ereignis-korrelierten-Potentials (EKP) bei visueller Stimulation gemessen an okzipito-temporalen Elektroden. Auf die erste positive Komponente „P1“ folgt die erste negative Komponente „N1“. Dann folgt die zweite positive Komponente „P2“, die zweite negative Komponente „N2“ und die dritte positive Komponente „P3“ (modifiziert nach Woodmann (2010)).

Die P1 Komponente ist eine der ersten Komponenten und zeigt ein positives Maximum, daher wird sie mit einem „P“ und einer „1“ bezeichnet. Ihr Maximum liegt etwa 100 bis 130 ms nach Beginn eines visuellen Stimulus. Die P1 ist am größten über okzipitalen Elektroden (Luck, 2014). Die Amplitude der P1 kann durch Aufmerksamkeit (Clark, Fan, & Hillyard, 1996) und das Ausmaß der Erregbarkeit (*arousal*) der Probanden beeinflusst werden (Vogel & Luck, 2000).

Die nächstfolgende N1 Komponente besteht aus mehreren Subkomponenten, wobei die erste Subkomponente (N1a) bei etwa 100-150 ms ein Maximum zeigt und zwei spätere Subkomponenten bei etwa 150-200 ms (Luck, 2014). Alle Subkomponenten können durch räumliche Aufmerksamkeit beeinflusst werden (Mangun, 1995). Die Amplitude der N1 ist größer bei Aufgaben, die eine Diskrimination von Stimuli erfordern (Vogel & Luck, 2000).

Im Zeitverlauf folgt die P2 Komponente, die über anterioren und zentralen Elektroden am größten ist (Luck, 2014). Ihre Amplitude kann in Detektionsaufgaben durch

Auftreten des als Ziel definierten Stimulus (*Target*) größer werden (Luck & Hillyard, 1994).

Als nächstes tritt die N2 Komponente auf, welche in eine N2a, anteriore N2b und posteriore N2c Subkomponente unterteilt werden kann (für einen Übersichtsartikel siehe Folstein & Van Petten, 2008). Die N2a kann durch abweichende visuelle Stimuli (auch deviante Stimuli genannt und üblicherweise in sogenannten *oddball*-Paradigmen verwendet) in einem Strom gleicher Stimuli erzeugt werden (Czigler, Balázs, & Winkler, 2002). Die anteriore N2a wird mit verschiedenen kognitiven Prozessen in Zusammenhang gebracht. Dazu gehören zum Beispiel Antwort-Unterdrückung (Bruin & Wijers, 2002) und Antwort-Konflikte (Folstein & Van Petten, 2008). Die posteriore N2c kann durch die Häufigkeit von *Targets* beeinflusst werden (Luck, 2014).

Schließlich folgt die P3 Komponente, die aus einer fronto-zentralen P3a und einer zentro-parietalen P3b Subkomponente besteht. Die P3a tritt etwa 300 ms nach der Präsentation eines seltenen, unbekanntes und nicht aufgabenrelevanten Stimulus auf und wird daher auch als Neuheits-P3 (*novelty-P3*) bezeichnet (Friedman, Cycowicz, & Gaeta, 2001). Die P3b tritt nach etwa 500 ms auf und wird durch aufgabenrelevante *Target*-Stimuli erzeugt (*Target-P3*). Die Bedeutung der P3b ist noch nicht abschließend geklärt, aber sie wird in Zusammenhang gebracht mit der Wahrscheinlichkeit der *Targets*, der Schwierigkeit der Aufgaben und der Kategorisierung der Stimuli (Luck, 2014). Die P3a wird auch im Zusammenhang mit *bottom-up*-Aufmerksamkeit und die P3b mit *top-down*-Aufmerksamkeit diskutiert (Debener, Kranczioch, Herrmann, & Engel, 2002). Im Folgenden ist mit dem Begriff „P3“ immer die P3b Komponente gemeint.

1.3. Bisherige visuell-taktile Studien

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Analyse von EKP bei visuell-taktile Stimulation. Daher sollen im Folgenden einige Studien zu diesem Thema kurz

vorgelegt werden. Besondere Beachtung finden hierbei Studien mit gleichzeitiger visueller und taktiler Stimulation.

Eine Reihe von Studien von Eimer und Kollegen untersuchte visuelle und taktile Stimuli. Neben Verhaltensdaten wurden auch EKP zu visueller und taktiler Aufmerksamkeit untersucht. In diesen Studien erfolgte die Stimulation nicht gleichzeitig, es zeigte sich jedoch, dass die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf taktile Stimuli auch die visuelle Verarbeitung beeinflussen kann (Eimer & Driver, 2000; Eimer & van Velzen, 2005).

In einer Studie von Forster und Pavone (2008) wurde die Lokalisation taktiler Stimuli mit als Distraktoren wirkenden visuellen Stimuli untersucht. Waren der visuelle und der taktile Stimulus nicht am gleichen Ort, was in dieser Studie als Inkongruenz bezeichnet wurde, so zeigte sich eine größere N2 Komponente. Dies wurde als Hinweis auf einen Antwortkonflikt gewertet.

Einige Studien mit visuell-taktilen Stimuli untersuchten die EKP von unimodaler und bimodaler Stimulation, um zu betrachten, ob die bimodale Simulation die Verarbeitung modulieren kann. Dionne et al. (2013) konnten für den Vergleich von taktiler und visuell-taktiler Stimulation eine Modulation der P50, P100 und N140 Komponente finden. Auch Wang et al. (2012) konnten in einer Detektionsaufgabe mit visuellen, taktilen und auditorischen *Targets* größere N1 und P2 Komponenten bei der bimodalen Detektion von visuellen und taktilen *Targets* verglichen zur unimodalen Stimulation finden. In einer anderen Studie wurde die Überlappung zwischen visueller und taktiler Stimulation variiert und eine Modulation des EKP für taktile Stimuli beobachtet, die von einem visuellen Stimulus angekündigt wurden. Hier zeigten sich Veränderungen in sehr frühen Komponenten, die als P50 zusammengefasst werden können, wobei diese Komponenten noch weiterer Beschreibung bedürfen (Popovich & Staines, 2014).

Eine weitere häufig betrachtete Frage ist, ob das Sehen der stimulierten Hand die taktile Verarbeitung verändert. Verglichen wurden so zum Beispiel somatosensorische EKP, bei denen die Berührung des eigenen Armes gesehen

werden konnte mit EKP, bei denen die Berührung nicht gesehen werden konnte. Es zeigte sich eine größere N80 Komponente durch Sehen der taktilen Stimulation. Diese Effekte waren deutlicher, wenn die taktilen Stimuli aufgabenrelevant waren (Taylor-Clarke, Kennett, & Haggard, 2002).

Gherri et al. (2015) konnten beobachten, dass durch die Betrachtung der taktil stimulierten Hand eine Modulation der N140 Komponente hervorgerufen wird. Sie konnten zudem beobachten, dass die Ausrichtung der räumlichen Aufmerksamkeit auf die taktilen Stimuli eine Modulation der P100 Komponente erzeugt. In ähnlicher Weise wurden auch EKP bei der *rubber hand illusion* (engl. Gummihand-Illusion) analysiert. Bei diesem Paradigma wird die Hand des Probanden für diesen nicht sichtbar in einer Box platziert, auf welcher sich eine Gummihand befindet. Dann werden die Hand des Probanden und die Gummihand gleichzeitig berührt. Verändert wird die Position der Gummihand, welche kongruent oder inkongruent zu der echten Hand sein kann. Bei der kongruenten Position der Gummihand wird die Illusion erzeugt, dass die Gummihand zu einem selbst gehören würde. Bei der inkongruenten Position entsteht ein Konflikt zwischen der gesehenen Gummihand und der eigenen Handposition. Für diesen Fall konnte in den EKP eine größere Amplitude ab 55 ms gefunden werden, wobei die Quellen im Gyrus postcentralis und im unteren Parietallappen lokalisiert werden konnten. Dies kann als Hinweis auf eine verstärkte somatosensorische Verarbeitung bei widersprüchlichen Informationen gewertet werden (Zeller, Litvak, Friston, & Classen, 2015).

Weiterhin wurde untersucht, wie visuell-taktile Integration durch die räumliche Anordnung der Stimuli beeinflusst werden kann. Mahoney et al. (2015) zeigten visuelle und taktile Stimuli an der linken oder rechten Hand und dort an Daumen oder Zeigefinger. Es konnte für sehr frühe EKP Komponenten ab 55 ms eine kleinere Amplitude durch die Präsentation der Stimuli auf der gleichen räumlichen Seite gezeigt werden. Diese Effekte waren nur vorhanden, wenn die Stimuli an der rechten Hand dargeboten wurden. Spätere Komponenten hingegen unterschieden sich nicht zwischen räumlich gleichen und ungleichen Präsentationen.

Eine Studie zur Lokalisierung von taktilen Stimuli im Raum hat auch visuell-taktile EKP genutzt. Die EKP visuell-taktile Stimuli, die nicht aufgabenrelevant waren, wurden untersucht. Hier konnte beobachtet werden, dass in den ersten 100 ms visuell-taktile Integration basierend auf dem somatotopischen Bezugsrahmen stattfindet, welcher auf der relativen Abbildung der Körperregionen im somatosensorischen Kortex beruht. Ab 180 ms findet dann zusätzlich eine Zuordnung der taktilen Stimuli durch den externen Bezugsrahmen statt, der auf der relativen Lage der Stimuli im Raum basiert (Ley, Steinberg, Hanganu-Opatz, & Röder, 2015).

Anhand dieses kurzen Überblicks wird deutlich, dass nur einige wenige Studien die EKP von gleichzeitiger visueller und taktiler Stimulation untersucht haben. Zudem sind die untersuchten Fragestellungen sehr unterschiedlich. So wurde der Einfluss der räumlichen Anordnung der Reize, das Sehen der taktilen Stimulation oder der Vergleich von unimodaler und bimodaler Stimulation untersucht. Die in dieser Arbeit präsentierte EKP-Studie (Studie 1) unterscheidet sich insofern von den oben genannten, als dass hier visuelle und taktile Stimuli immer gleichzeitig präsentiert wurden und auch gleichermaßen beachtet werden sollten. Eine Modulation erfolgte durch die Aufgabenstellung und die Kongruenz zwischen den visuellen und taktilen Punktemustern.

2. Studie 1: Ereignis-korrelierte-Potentiale vom Abgleich visuell-taktile Musterpaare

Design und Versuchsaufbau: Florian Göschl, Andreas K. Engel; **Datenerhebung:** Florian Göschl, Julia Götz; **Vorverarbeitung der EEG-Daten:** Florian Göschl; **Bereitstellen von Analyse-Software:** Florian Göschl; **Datenanalyse:** Julia Götz; **Diskussion:** Julia Götz.

2.1. Einleitung

Visuelle und taktile Eigenschaften eines Objekts sind in unserer natürlichen Umgebung nicht nur räumlich an gleicher Stelle, sie haben auch eine äußere Form, die sich visuell und taktil wahrnehmen lässt. Im Rahmen einer EKP-Studie wurde hier untersucht, wie die Übereinstimmung, also die Kongruenz, zwischen visueller und taktile Form unsere Wahrnehmung beeinflussen kann. Hierzu wurden vier verschiedene Muster aus drei Punkten entworfen, wobei jeweils ein visuelles und ein taktile Punktemuster gleichzeitig gezeigt wurden. Zwei Aufgaben wurden durchgeführt. In der **Detektionsaufgabe** musste ein vorab definiertes *Target* in dem präsentierten Stimuluspaar gesucht werden. Dabei konnte das *Target* nur visuell, nur taktil, in beiden Modalitäten oder in keiner Modalität auftreten. Bei vorgegebenen *Targets* musste die Aufmerksamkeit also auf beide Modalitäten gerichtet werden und Kongruenz war nicht aufgabenrelevant. Es wurden die EKP von der Verarbeitung von *Targets* und von *Nicht-Targets (Non-Targets)* verglichen. Zudem wurde der Einfluss von visuell-taktile Muster-Kongruenz betrachtet, auch wenn dieser nicht aufgabenrelevant war. Bei Vorhandensein von visuellen *Targets* zeigen sich häufig Effekte im Bereich der P3, so dass dort eine größere Amplitude erwartet wird (Luck, 2014; Strüber & Polich, 2002). Wie in Abschnitt 1.3 dargestellt gibt es eine Reihe von Studien, die EKP bei visuell-taktile Stimuli untersucht haben. Es wurden Modulationen in verschiedenen Komponenten wie der P50, P100 und N140 (Dionne, Legon, & Staines, 2013), der N1 und P2 (Wang, Hu, Valentini, Xie, Cui, & Hu, 2012) und der N80 (Taylor-Clarke, Kennett, & Haggard, 2002) gefunden. Diese Beobachtungen lassen sich jedoch nicht auf die vorliegende Studie übertragen, da

unterschiedliche Fragestellungen mit anderen Formen der Kongruenz untersucht wurden. Für die in der vorliegenden Studie untersuchte Form der Kongruenz wäre es denkbar, dass das Erkennen der Muster und deren Abgleich aufwendigere Prozesse sind, die sich eher in späteren Komponenten zeigen. Unterstützt wird diese Vermutung durch die Ergebnisse der Analyse der Oszillationen von Göschl et. al (2015), da hier Kongruenzeffekte ab 700 ms beobachtet wurden.

Bei der **Kongruenzevaluationsaufgabe** mussten beide Muster miteinander verglichen werden. Dann wurde entschieden, ob die Muster kongruent oder inkongruent waren. Auch hier wären aufgrund der aufwendigeren kognitiven Prozesse zum Erkennen und Vergleichen der Muster Effekte in späteren Komponenten vorstellbar.

Da beide Aufgaben sich nur anhand der Aufgabenstellung unterscheiden und die physikalische Stimulation in beiden Aufgaben gleich war, wurden auch die EKP zwischen den beiden Aufgaben miteinander verglichen. Hierdurch sollten für die Aufgaben typische Prozesse isoliert werden. Es lässt sich vermuten, dass die **Kongruenzevaluationsaufgabe** aufgrund des explizit erforderlichen Abgleichs der Muster die aufwendigere Aufgabe ist und somit andere neuronale Prozesse als in der **Detektionsaufgabe** in den EKP deutlich werden könnten.

Das in diesem Experiment benutzte Paradigma wurde bereits im Rahmen einer Verhaltensstudie etabliert. Göschl et al. (2014) konnten für die Detektion von *Targets* schnellere Reaktionszeiten und bessere Detektionsraten beobachten, wenn die visuell-taktilen Muster kongruent zueinander waren. Bei der Kongruenzevaluation waren diese Effekte für Kongruenz noch größer. Für die in dieser Studie untersuchten EEG-Daten gibt es zudem eine Analyse der Zeit-Frequenz-Daten (Göschl, Frieze, Daume, König, & Engel, 2015), so dass nun explizit die EKP analysiert werden sollen.

2.2. Material und Methoden

2.2.1. Versuchspersonen

Von 17 Versuchspersonen konnten 16 ein vorab durchgeführtes Training bestehen und an der Studie teilnehmen. 12 waren weiblich, das Alter lag zwischen 21 und 33 Jahren und das mittlere Alter bei 25.4 Jahren. Die Teilnahme an der Studie wurde mit 10 Euro pro Stunde vergütet und erfolgte nach informierter Einwilligung. Nach eigenen Angaben waren alle Versuchspersonen rechtshändig, hatten eine normale oder korrigiert normale Sehfähigkeit und bisher keine neurologischen oder psychiatrischen Erkrankungen. Eine Zustimmung durch die Ethik-Kommission der Ärztekammer Hamburg für die Studie lag vor (weitere Details siehe Göschl et al., 2015).

2.2.2. Stimulusmaterial und Versuchsaufbau

In dieser Studie wurden Stimuli aus einer vorherigen Verhaltensstudie genutzt (Göschl, Engel, & Friese, 2014). Die Stimuli bestanden aus jeweils drei Punkten, die zusammen vier verschiedene räumliche Muster bildeten (Abb. 1a) Es wurde gleichzeitig ein visuelles und ein taktiles Muster präsentiert. Das taktile Muster wurde an der Fingerbeere des rechten Zeigefingers präsentiert mittels eines Braille-Stimulators (QuaeroSys Medical Devices, Schotten, Deutschland). Die Stimulation erfolgte über eine Pin-Matrix, bestehend aus zwei Spalten und vier Reihen von Pins, die einzeln über Piezo Biegewandler angesteuert und angehoben werden konnten. Die einzelnen Pins hatten einen Durchmesser von 1 mm und einen Abstand zueinander von 2.5 mm. Während der Stimulation wurden die Pins für das jeweilige Muster gleichzeitig um etwa 1.5 mm angehoben und nach 300 ms durch Abschalten der Spannung wieder abgesenkt. Die Stimationsparameter wurden in einer vorhergehenden Versuchsreihe erprobt (Göschl, Engel, & Friese, 2014). Die Braille-Stimulationszelle war in ein speziell angefertigtes Plastikbrett eingebettet, umgeben von einer Schiene. So konnte der stimulierte Finger entspannt positioniert werden

ohne zu verrutschen. Zeitgleich zum taktilen Muster wurde das visuelle Muster für 300 ms auf einem Computerbildschirm präsentiert. Es bestand aus hellgrauen

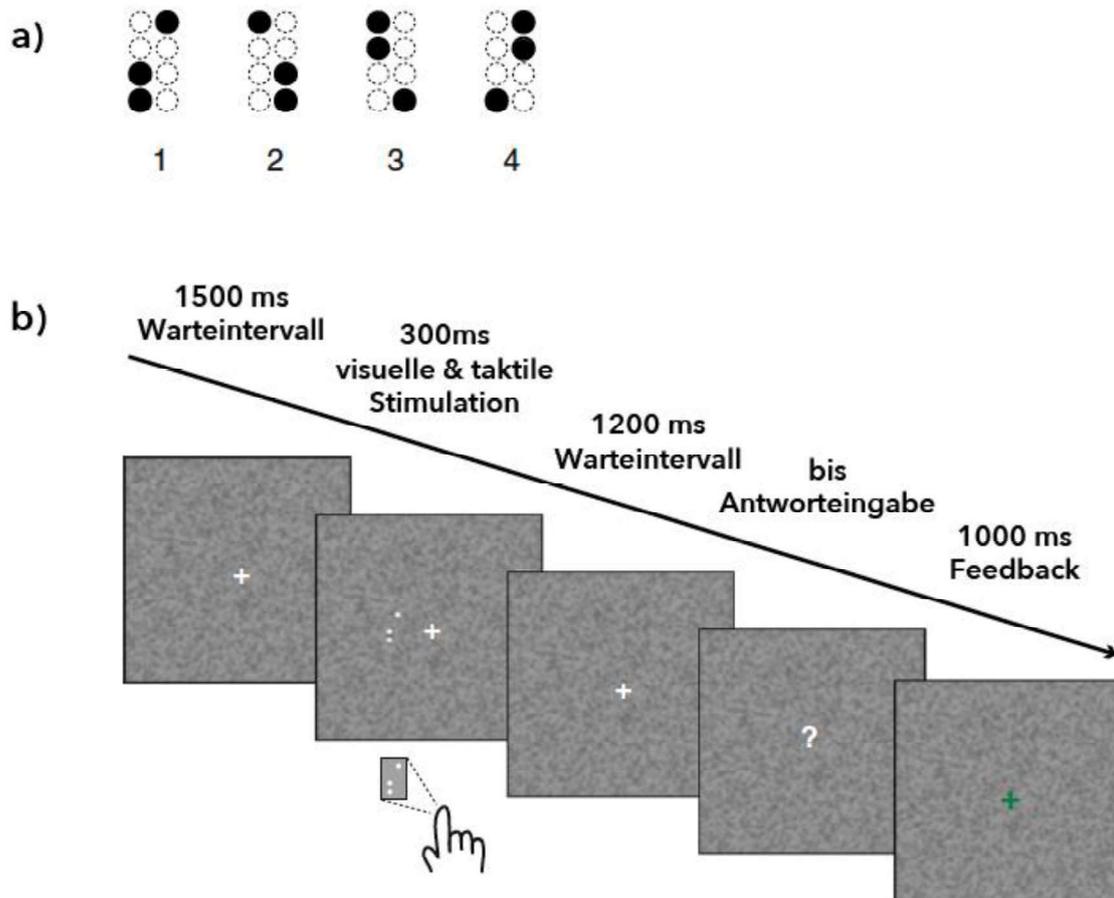


Abb. 2: Versuchsablauf von Studie 1

a) Die benutzten Punktemuster. b) Ablauf einer Runde. Nach einem Warteintervall (1500 ms) wurden die visuellen und taktilen Muster gleichzeitig präsentiert (300 ms). Nach einem Warteintervall (1200 ms) zeigte ein Fragezeichen an, dass die Antwort nun eingegeben werden konnte. Auf den Tastendruck folgte ein visuelles Feedback zur Antwort (1000 ms) (Modifiziert nach Göschl et al (2015))

Punkten, die im gleichen räumlichen Verhältnis angeordnet waren wie die Pins der taktilen Stimulation. Insgesamt maß das visuelle Muster $3,5^\circ \times 2,5^\circ$ des Seh winkels. In der Mitte des Bildschirms wurde ein Fixationskreuz gezeigt und $2,5^\circ$ links davon das Punktemuster. Im Hintergrund wurde ein verrauschtes graues Bild gezeigt. Während der Stimulation wurde über schaumstoffgepolsterte Einsteckkopfhörer rosa

Rauschen mit 75 dB abgespielt, um so durch die Pin-Bewegungen entstehende Geräusche zu überdecken. Die Versuchspersonen saßen in einer abgedunkelten, schalldichten und elektrisch isolierten Kammer auf einem gepolsterten Stuhl. Der Bildschirm war 110 cm entfernt, die Arme lagen entspannt auf einem Tisch vor dem Stuhl. Die Stimuluspräsentation sowie die Aufzeichnung der Reaktionszeiten, gemessen ab Stimulus-Onset, und die Antworteingaben wurde mit dem Programm Presentation (Neurobehavioral Systems, Version 16.3) durchgeführt (weitere Details siehe Göschl et al., 2015).

2.2.3. Trainingsablauf

Vor dem eigentlichen Versuch wurde ein taktils Training durchgeführt, um die Versuchspersonen mit den taktilen Stimuli vertraut zu machen. Zudem sollten Versuchspersonen, die die taktilen Stimuli nicht ausreichend gut erkennen konnten, von dem Versuch ausgeschlossen werden. Das Training erfolgte als *delayed-match-to-sample* Aufgabe. Jeder Trainingsdurchgang begann mit einem Warteintervall von 2000 ms. Dann wurde ein taktils Muster für 300ms gezeigt und nach weiteren 1000 ms wurde ein zweites taktils Muster für 300 ms gezeigt. Die Versuchspersonen sollten dann beurteilen, ob die gezeigten Stimuli gleich oder verschieden waren. Die Antwort wurde über einen Knopfdruck mit dem linken Mittel- oder Zeigefinger auf einem Tastenmodul (Cedrus, RB-420 Model, San Pedro, USA) eingegeben. Die Kodierung der Tasten für die jeweiligen Antwortmöglichkeiten war ausbalanciert zwischen den Versuchspersonen. Nach jeder Antworteingabe wurde auf dem Bildschirm ein grünes „+“ für eine richtige Antwort und ein rotes „-“ für eine falsche Antwort angezeigt (für jeweils 1000 ms). Ein Trainingsblock bestand aus 16 Runden. Es wurden acht Musterpaare entworfen, die zum Abgleich gezeigt wurden. Jedes Muster wurde viermal präsentiert und die Hälfte der Stimulus-Paare beinhaltete kongruente Muster und die andere Hälfte inkongruente. Alle Versuchspersonen mussten mindestens fünf Trainingsblöcke durchlaufen. Das Training war bestanden, wenn in zwei aufeinander folgenden Blöcken 80 % der Antworten richtig waren. Eine Versuchsperson hatte das Training nicht bestanden und konnte daher am eigentlichen Versuch nicht teilnehmen (weitere Details siehe Göschl et al., 2015).

2.2.4. Versuchsablauf

Der Versuch bestand aus zwei Aufgaben. Der Ablauf beider Aufgaben war grundsätzlich gleich. Jeder Block begann bei beiden Aufgaben mit einem Warteintervall von 1500 ms. Dann erfolgte die visuelle und taktile Stimuluspräsentation für 300 ms. Nun gab es erneut ein Warteintervall von 1200 ms. Dadurch sollte die Reizverarbeitung von der Vorbereitung der Antwort und der motorischen Antwort abgegrenzt werden. Ein Fragezeichen auf dem Bildschirm zeigte dann an, dass nun die Antwort eingegeben werden konnte. Für 1000 ms wurde anschließend angezeigt, ob die Antwort richtig oder falsch war, wieder über ein grünes „+“ oder ein rotes „-“ (Abb. 2). Beide Aufgaben wurden in Blöcken zu je 16 Runden abwechselnd absolviert. Die Versuchsdurchführung wurde für jede Versuchsperson auf zwei Tage aufgeteilt, wobei nicht mehr als ein Tag zwischen beiden Sitzungen lag. An jedem Tag wurden 48 Blöcke durchgeführt, so dass jede Versuchsperson insgesamt 1536 Durchgänge durchführte. Beide Aufgaben wurden gleich oft gemacht. Kongruente und inkongruente Musterpaare kamen gleich häufig vor. Auch jedes der vier Muster kam gleich oft vor, ebenso war jedes Muster gleich oft Zielmuster bei der **Detektionsaufgabe** (weitere Details siehe Göschl et al., 2015).

In der **Detektionsaufgabe** (Abb. 3) wurde zu Beginn jedes Blocks ein Zielmuster („*Target*“) vorgegeben. Dieses Muster wurde jeweils visuell und taktil viermal angezeigt. In den darauffolgenden Durchgängen sollte dieses *Target* in den präsentierten visuell-taktilen Musterpaaren gesucht werden. Das *Target* konnte nur visuell, nur taktil, in beiden Modalitäten oder gar nicht erscheinen. Die Versuchspersonen sollten dann durch Knopfdruck angeben, ob sie das *Target* gefunden hatten oder nicht.

Die zweite Aufgabe war die **Kongruenzevaluationsaufgabe** (Abb. 4). Hier sollte in jedem Durchgang beurteilt werden, ob das präsentierte Musterpaar kongruent oder inkongruent war. Die Antworteingabe erfolgte wieder mit Knopfdruck, wobei die Belegung der Tasten über die gesamte Studie hinweg ausbalanciert wurde.

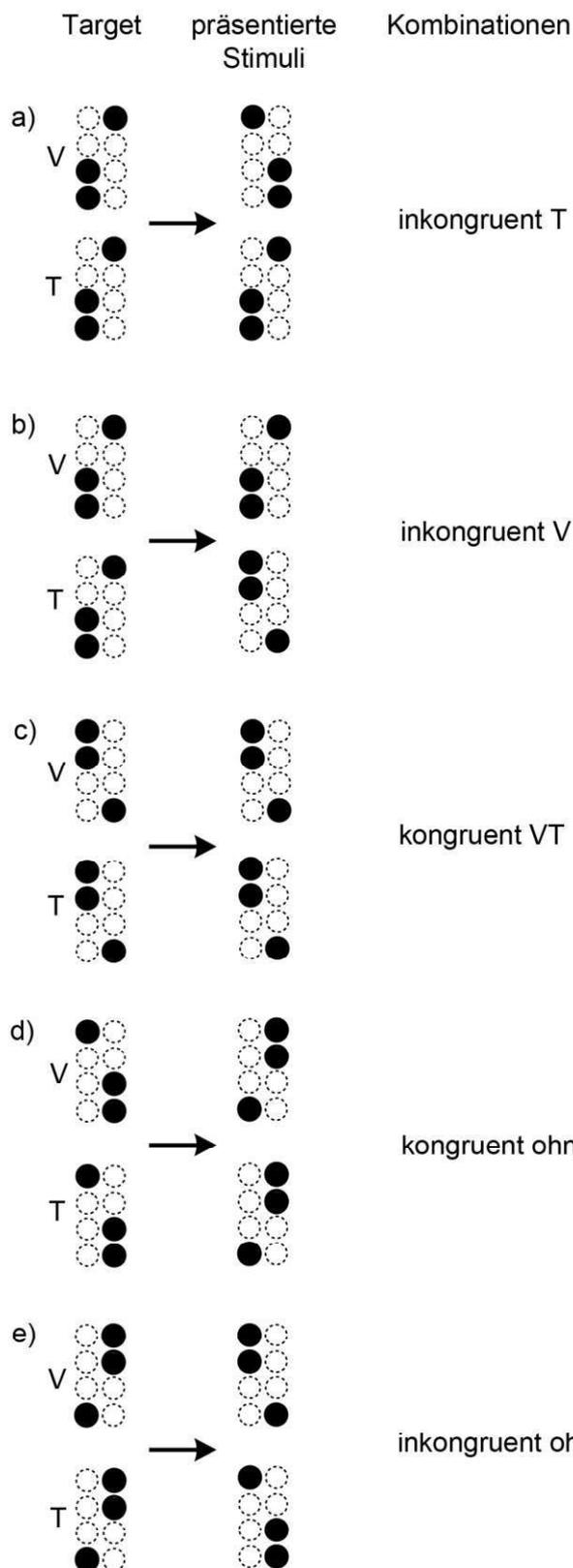


Abb. 3: Detektionsaufgabe aus Studie 1

Zu Beginn jedes Blocks wird ein visuell-taktiler *Target* vorgegeben. Das *Target* ist ein bestimmtes Punktemuster (links unter „*Target*“). In den darauffolgenden Durchgängen werden jeweils ein visueller („V“) und ein taktiles („T“) Stimulus präsentiert. Hier soll nach dem *Target* gesucht werden (rechts vom Pfeil „präsen- tierte Stimuli“). Ein *Target* kann visuell oder taktil oder in beiden Modalitäten oder gar nicht vorkommen. Die präsentierten Stimuli können dabei kongruent oder inkongruent zueinander sein. Dadurch ergeben sich fünf Kombinationen von visuell-taktilen Musterpaaren (rechts unter „Kombinationen“):

a) Die präsentierten Stimuli sind inkongruent und ein taktiles *Target* ist vorhanden (*inkongruent T*).

b) Die präsentierten Stimuli sind inkongruent und ein visuelles *Target* ist vorhanden (*inkongruent V*).

c) Die präsentierten Stimuli sind kongruent und ein taktiles und ein visuelles *Target* sind vorhanden (*kongruent VT*).

d) Die präsentierten Stimuli sind kongruent und kein *Target* ist vorhanden (*kongruent ohne Target*).

e) Die präsentierten Stimuli sind inkongruent und kein *Target* ist vorhanden (*inkongruent ohne Target*).

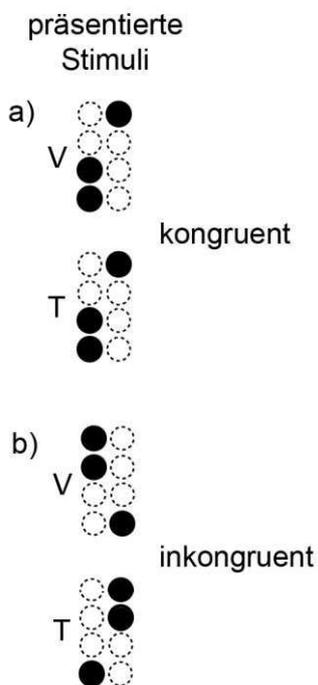


Abb. 4: Kongruenzevaluationsaufgabe aus Studie 1

In dieser Aufgabe sind keine *Targets* vorgegeben. In Durchgängen werden jeweils ein visueller („V“) und ein taktiler („T“) Stimulus präsentiert. Diese Stimuli sollen miteinander verglichen werden. Daraus ergeben sich zwei Kombinationen:

- a) Die Stimuli sind kongruent zueinander.
- b) Die Stimuli sind inkongruent zueinander.

2.2.5. Einteilung der Daten

Die Musterpaare der **Detektionsaufgabe** wurden in fünf Kombinationen eingeteilt (Abb. 3). Bei der ersten Kombination gab es nur ein visuelles *Target* und kein taktiler, diese wird im Folgenden als *inkongruent V* bezeichnet. Bei der zweiten Kombination gab es nur ein taktiler *Target* (*inkongruent T*). Bei der dritten Kombination gab es ein visuelles und ein taktiler *Target*, so dass die Stimuli auch kongruent waren (*kongruent VT*). Bei der vierten Kombination gab es kein *Target* und die Stimuli waren kongruent (*kongruent ohne Target*). Bei der fünften Kombination gab es kein *Target* und die Stimuli waren inkongruent (*inkongruent ohne Target*).

Die Musterpaare der **Kongruenzevaluationsaufgabe** wurden in zwei Kombinationen eingeteilt (Abb. 4). Bei der Kombination *kongruent* gab es kongruente Stimuli, bei der Kombination *inkongruent* gab es inkongruente Stimuli.

Die Kombinationen beider Aufgaben beinhalteten jeweils 192 Runden, nur die *kongruent ohne Target* Kombination bestand aus 384 Runden um die *inkongruent V* und *inkongruent T* Kombinationen auszugleichen.

2.2.6. Analyse der Verhaltensdaten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Genauigkeiten und Reaktionszeiten wurden berechnet und mittels Varianzanalysen mit Messwiederholungen (*repeated measures Analysis of Variance*, ANOVA) analysiert. Signifikante Effekte wurden mit Post-hoc t-Tests (paarweise t-Tests) weiter analysiert.

2.2.7. EEG-Aufzeichnung

Die EEG-Aufzeichnung erfolgte kontinuierlich mithilfe eines BrainAmp-Verstärkers (BrainProducts, München, Deutschland) von 126 Ag/AgCl Ringelektroden (Elektrodenlayout siehe Abb. 5), die auf einer elastischen Haube (EASYCAP, Herrsching, Deutschland) angebracht waren. Die Daten wurden mit einem Breitbandfilter von 0.016-150 Hz und mit einer Abtastrate von 1000 Hz aufgezeichnet. Die Elektrodenwiderstände wurden unter 20 k Ω gehalten. Zur Ableitung der Elektroofokulogramms (EOG) wurden zwei zusätzliche Elektroden unterhalb der Augen angebracht. Eine weitere Elektrode auf der Nasenspitze diente als Referenz während der Aufzeichnung. Nachträglich wurde gegen den Mittelwert aller Elektroden re-referenziert (weitere Details siehe Göschl et al., 2015).

2.2.8. Vorverarbeitung der EEG-Daten

Die Analyse der Daten erfolgte mit Matlab 7.1 (MathWorks Natick, MA) und Funktionen aus EEGLAB 11.0 (Delorme & Makeig, 2004) und Fieldtrip (Oostenveld, Fries, Maris, & Schoffelen, 2011). Nur korrekt beantwortete Durchgänge wurden in der Analyse berücksichtigt. Zunächst wurden die Daten Bandpass-gefiltert (0.3 – 180 Hz), dann auf eine Abtastrate von 500 Hz runtergerechnet. Anschließend erfolgte die Epochierung der Daten von –400 ms vor bis +1400 ms nach

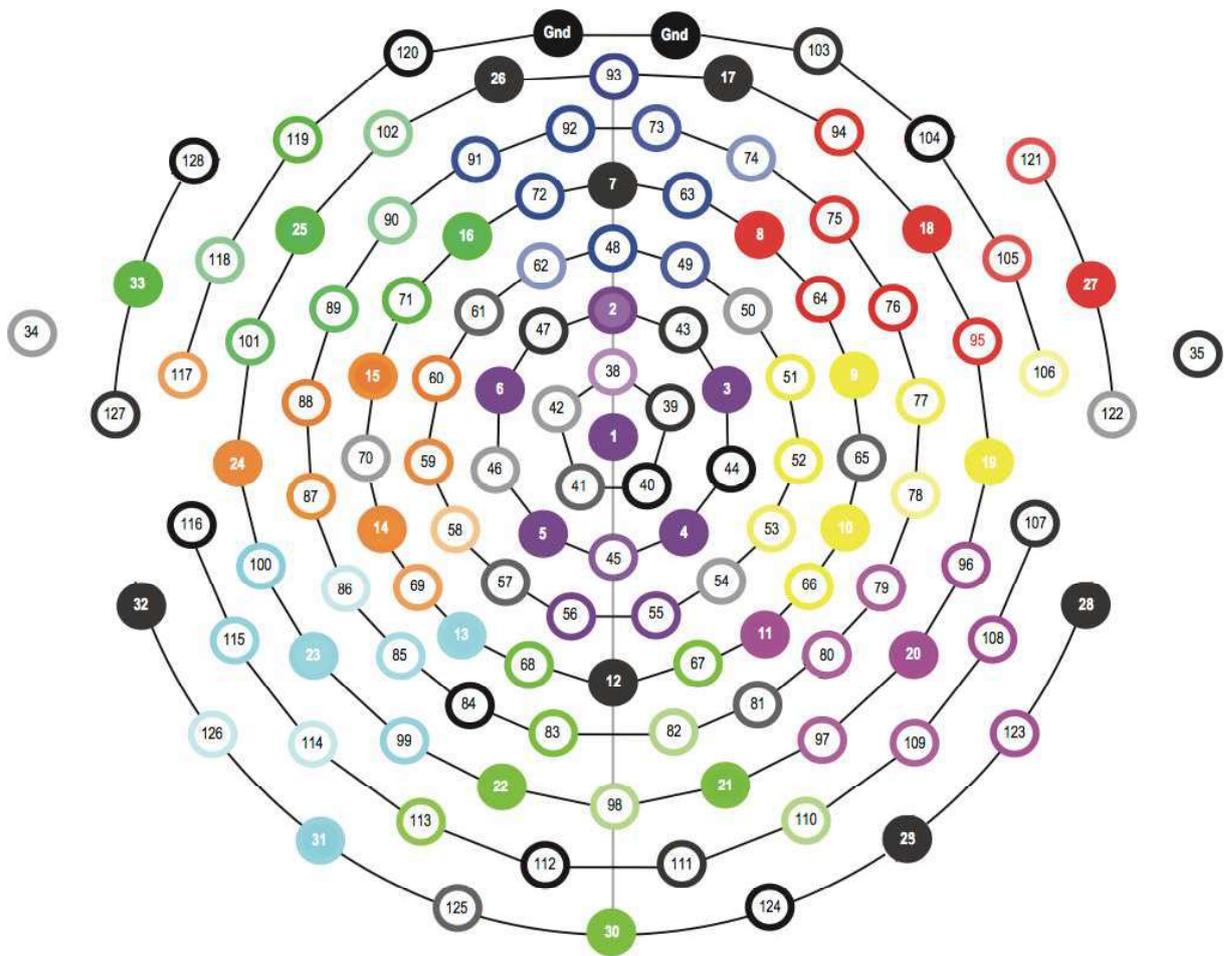


Abb. 5: Elektrodenlayout und Regionen von Interesse

Schema der äquidistanten Anordnung der 126 Skalpелеktroden. Für die Analyse der EEG-Daten in Studie 1 mittels des Running-t-Tests wurden 9 ROIs gebildet. Zu ROI links-frontal (dunkel-grün) gehören die Elektroden 16, 25, 33, 71, 89, 90, 101, 102, 118, 119. Zu ROI zentral-frontal (dunkel-blau) gehören die Elektroden 48, 49, 62, 63, 72, 73, 74, 91, 92, 93. Zu ROI rechts-frontal (rot) gehören die Elektroden 8, 18, 27, 64, 75, 76, 94, 95, 105, 121. Zu ROI links-zentral (orange) gehören die Elektroden 14, 15, 24, 58, 59, 60, 69, 87, 88, 117. Zu ROI zentral (dunkel-lila) gehören die Elektroden 1, 2, 3, 4, 5, 6, 38, 45, 55, 56. Zu ROI rechts-zentral (gelb) gehören die Elektroden 9, 10, 19, 51, 52, 53, 66, 77, 78, 106. Zu ROI links-posterior (hell-blau) gehören die Elektroden 13, 23, 31, 85, 86, 99, 100, 115, 126. Zu ROI zentral-posterior (hell-grün) gehören die Elektroden 21, 22, 30, 67, 68, 82, 83, 98, 110, 113. Zu ROI rechts-posterior (hell-lila) gehören die Elektroden 11, 20, 29, 79, 80, 96, 97, 109, 108, 123. (Modifiziert nach einer Abbildung von EASYCAP, Herrsching, Deutschland).

Stimuluspräsentation. Im Anschluss wurden die Daten visuell inspiziert und Durchgänge ausgeschlossen die Muskelartefakte enthielten. Zur Entfernung von Artefakten durch horizontale Augenbewegungen, Augenblinzeln und elektrische Herzaktivität wurde eine unabhängige Komponentenanalyse (*independent component analysis*, ICA) durchgeführt. Mithilfe der ICA lässt sich das EEG-Signal in zugrundeliegende zeitlich unabhängige Komponenten zerlegen. Damit wurden Artefakte ausgemacht und ausgeschlossen (Jung, Makeig, McKeown, Bell, Lee, & Sejnowski, 2001). Während der visuellen Fixation unwillkürlich auftretende Mikrosakkaden können sich im EEG-Signal als myogene Aktivität zeigen (Martinez-Conde, Macknik, Troncoso, & Hubel, 2009). Dadurch entstehende Mikrosakkaden-Artrefakte (*minimal saccadic artifacts*) wurden mit dem COSTRAP Algorithmus (*correction of saccade-related transient potentials*) von Hassler et al. (Hassler, Trujillo Barreto, & Gruber, 2011) aus den Daten entfernt (siehe auch Friese, Köster, Hassler, Martens, Trujillo-Barreto, & Gruber, 2013; Hassler, Friese, Martens, Trujillo-Barreto, & Gruber, 2013). 88 % aller aufgezeichneten Durchgänge blieben nach der Artefaktkorrektur übrig (weitere Details siehe Göschl et al., 2015).

2.2.9. Analyse der EEG-Daten

Für die Berechnung der EKP wurden die Elektroden in 9 Regionen von Interesse (*Regions of Interest*, ROI) aufgeteilt. Diese Regionen wurden bezeichnet als links-frontal (LF), zentral-frontal (ZF), rechts-frontal (RF), links-zentral (LZ), zentral (Z), rechts-zentral (RZ), links-posterior (LP), zentral-posterior (ZP) und rechts-posterior (RP; siehe Abb. 5). Für jede der Kategorien und für jede ROI wurden anschließend die EKP im Zeitraum von -200 bis 1000 ms ermittelt. Dann wurde ein Running-t-Test zum Vergleich der einzelnen Kombinationen berechnet. Diese Methode, eingehend von Guthrie und Buchwald (1991) beschrieben, erlaubt es aufeinander folgende Datenpunkte zu betrachten und Unterschiede zwischen 2 Zeitreihen zu detektieren, ohne vorab eine Eingrenzung auf bestimmte Bereiche vorzunehmen. Anstatt für jeden Zeitpunkt einzelne t-Tests zu berechnen und so durch multiple Vergleiche eine starke Korrektur des Signifikanzniveaus vornehmen zu müssen, werden die Unterschiede für den gesamten Zeitbereich berechnet. Als signifikant

gekennzeichnet wurden Bereiche, bei denen mindestens 20 ms zusammenhängende Daten Unterschiede unter einem Signifikanzniveau α von 0.01 zeigten. Dies entsprach 10 aufeinander folgenden Datenpunkten bei einer Abtastrate von 500 Hz. Zur Vermeidung einer Alphafehler-Kumulierung bei multiplen Vergleichen in 9 ROIs wurde nach Bonferroni korrigiert ($\alpha = 0.01/9$). Der Running-t-Test war gut geeignet für eine erste Exploration der Daten und visuelle Darstellung der Unterschiede zwischen den EKP-Kurven.

Zur weiteren Analyse der Unterschiede zwischen den Bedingungen wurde jedoch eine andere Methode gewählt und ebenso der gesamte Zeitraum des gemessenen EKP betrachtet. Die Elektroden wurden nicht in vordefinierte Regionen eingeteilt. Durch den Vergleich einer Vielzahl an Datenpunkten, Elektroden und Bedingungen hätte sich dadurch allerdings ein Problem durch multiple Vergleiche (*multiple comparison problem*) mit nicht zu kontrollierender Family-Wise-Error-Rate ergeben. Daher wurde ein Cluster-basierter Permutationstest zur Analyse verwendet. Die hier beschriebene Methode ist in Fieldtrip implementiert (Oostenveld, Fries, Maris, & Schoffelen, 2011). Ein t-Test wurde für die zu vergleichenden Bedingungen für jede Elektrode und jeden Datenpunkt im Zeitraum von 0 bis 1000 ms berechnet. t-Werte die unter einem p-Wert von 0.05 lagen, wurden für die Bildung von Clustern verwendet. Zu Clustern gruppiert wurden t-Werte, die an zeitlich zusammenhängenden Datenpunkten lagen und zu benachbarten Elektroden gehörten. Die Summe der t-Werte eines Clusters wurde für die Berechnung der Cluster-Statistik genutzt. Dann wurde ein Permutationstest berechnet, bei dem die Daten 1000-mal zufällig den Bedingungen zugewiesen und jeweils t-Tests berechnet wurden. So konnte die Verteilung maximaler t-Werte berechnet werden. Cluster aus den Originaldaten wurden als signifikant betrachtet, wenn unter 0.025% der Permutationen eine größere maximale Cluster-Statistik als die Original-Cluster-Statistik hatten. Die signifikanten Cluster zwischen den jeweiligen Bedingungen wurden in 50 ms Abschnitten in topographischen Plots dargestellt.

Für die **Detektionsaufgabe** wurden zunächst die Effekte durch das Vorhandensein eines *Targets* untersucht. Die Effekte durch ein visuelles und ein taktiles *Target* wurden betrachtet durch den Vergleich zu Durchgängen ohne *Target* und ohne

Kongruenz. Dafür wurden jeweils *inkongruent T* und *inkongruent V* mit *inkongruent ohne Target* verglichen. Auch *kongruent VT* und *kongruent ohne Target* wurden verglichen. Da beide Kombinationen kongruent sind kann hier untersucht werden, welchen Effekt ein visuelles und ein taktiles *Target* zusammen haben. Dann wurde betrachtet, ob Kongruenz bei dieser Aufgabe einen zusätzlichen Effekt zum Vorhandensein von *Targets* hatte, obwohl sie nicht aufgabenrelevant war. Es wurde *kongruent VT* mit *inkongruent T* und *kongruent VT* mit *inkongruent V* verglichen. Auch *inkongruent V* und *inkongruent T* wurden verglichen. Zudem wurde untersucht, ob Kongruenz bei Kombinationen ohne *Targets* einen Effekt hatte (*inkongruent ohne Target* vs. *kongruent ohne Target*). Unterschiede zwischen *kongruent VT* und *inkongruent ohne Target* wurden nicht betrachtet, da dieser Vergleich keine Differenzierung zwischen Effekten durch Kongruenz oder durch Vorhandensein von *Targets* ermöglicht.

Anschließend wurde bei der **Kongruenzevaluationsaufgabe** der Effekt von aufgabenrelevanter Kongruenz (*kongruent* vs. *inkongruent*) analysiert. Zur Analyse der Effekte durch die Aufgabenstellung bei gleichem Stimulusmaterial wurden die kongruenten Kombinationen (*kongruent VT*, *kongruent ohne Target* und *kongruent*) sowie inkongruenten Kombinationen (*inkongruent ohne Target* und *inkongruent*) der **Detektionsaufgabe** und der **Kongruenzevaluationsaufgabe** verglichen.

Für die Zeiträume der signifikanten Cluster auf Kanal-Ebene wurde eine Quellenanalyse durchgeführt. Damit sollten die wahrscheinlichen kortikalen Quellen der an der Kopfoberfläche gemessenen elektrischen Signale rekonstruiert werden. Hierfür wurde die eLORETA-Methode (*exact low-resolution brain electromagnetic tomography*) angewendet (Pascual-Marqui, 2007). Mit eLORETA kann die dreidimensionale Verteilung der Stromdichte aus den EEG-Daten berechnet werden. Die eLORETA-Verteilungen wurden auf Grundlage eines realistischen dreischichtigen Kopfmodells (MNI152 Modell, Montreal Neurological Institute; <http://www.mni.mcgill.ca>) berechnet. Innerhalb eines Gitternetzes aus 3000 Voxeln wurde die Quellenaktivität und das Leadfield nach der Methode von Nolte und Dassios (2005) bestimmt. Die berechneten Quellenmaxima wurden mit paarweisen t-Tests innerhalb der Versuchspersonen und zwischen den Kombinationen verglichen

und mit der False Discovery Rate (FDR) Methode für multiple Vergleiche korrigiert ($\alpha = 0.1$). Blieben nach der FDR-Korrektur keine signifikanten Werte zurück, so wurden die t-Werte unkorrigiert dargestellt. Die anatomische Kennzeichnung der Kortexareale wurde mit den NFRI-Funktionen (Singh, Okamoto, Dan, Jurcak, & Dan, 2005) und dem Brodmann-Area-Atlas vorgenommen (Lancaster, et al., 2000).

2.3. Ergebnisse

2.3.1. Verhaltensdaten

Eine Analyse der in dieser Studie erhobenen Verhaltensdaten ist bei Göschl et al. (2015) zu finden und wurde hier ergänzt. Die Reaktionszeiten und Genauigkeiten (Anteil korrekter Antworten an allen Antworten) wurden berechnet (Tabelle 1). Für die **Detektionsaufgabe** wurde eine 1 x 3 ANOVA für die Genauigkeiten der Kombinationen *kongruent VT*, *inkongruent V* und *inkongruent T* berechnet. Hier zeigte sich ein signifikanter Effekt für Kongruenz ($F_{2, 30} = 23.28, p < 0.01$). *Kongruent VT* erzielte die höchsten Genauigkeiten, gefolgt von *inkongruent V* und *inkongruent T*. Post-hoc t-Tests zeigten signifikant höhere Genauigkeiten für *kongruent VT* als für *inkongruent V* ($t_{15} = 4.37, p < 0.01$) und signifikant höhere Genauigkeiten für *kongruent VT* als für *inkongruent T* ($t_{15} = 6.58, p < 0.01$). *Inkongruent V* zeigte höhere Genauigkeiten als *inkongruent T* ($t_{15} = 3.49, p < 0.01$). Eine 1 x 3 ANOVA für die Kategorien *inkongruent T*, *inkongruent V* und *inkongruent ohne Target* zeigte einen signifikanten Effekt für das Vorhandensein eines *Targets*, ohne das Kongruenz vorhanden war ($F_{2, 30} = 10.27, p < 0.01$). Post-hoc t-Tests zeigten einen signifikanten Effekt für das Vorhandensein eines visuellen *Targets* (*inkongruent V*) im Vergleich zu Durchgängen ohne *Target* (*inkongruent ohne Target*) ($t_{15} = 7.71, p < 0.01$) und für visuelle im Vergleich zu taktilen *Targets* ($t_{15} = 3.49, p < 0.01$). Tendenziell höhere Genauigkeiten zeigten sich für *inkongruent T* im Vergleich zu *inkongruent ohne Target* ($t_{15} = 2.1, p = 0.053$). Ein Vergleich der kongruenten Kombinationen der **Detektionsaufgabe** (*kongruent VT* vs. *kongruent ohne Target*) mittels eines t-Tests zeigte signifikant höhere Genauigkeiten für *kongruent VT* ($t_{15} = 6.55, p < 0.01$).

Die Reaktionszeiten wurden analysiert, auch wenn die Antworten erst nach einem Warteintervall von 1200 ms gegeben werden konnten. Die Varianzanalyse zeigte einen signifikanten Effekt für Kongruenz ($F_{2, 30} = 6.59, p < 0.01$). Post-hoc t-Tests zeigten signifikant schnellere Reaktionszeiten für *kongruent VT* verglichen zu *inkongruent T* ($t_{15} = 3.11, p < 0.01$) und nicht signifikante Unterschiede zwischen *kongruent VT* und *inkongruent V* ($t_{15} = 1.91, p = 0.08$). Tendenziell schnellere Reaktionszeiten zeigten sich für *inkongruent V* im Vergleich zu *inkongruent T* ($t_{15} = 2.08, p = 0.055$). Eine 1 x 3 ANOVA für die Kategorien *inkongruent T*, *inkongruent V* und *inkongruent ohne Target* zeigte einen signifikanten Effekt für das Vorhandensein von *Targets* ($F_{2, 30} = 5.08, p = 0.026$). Post-hoc t-Tests zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Vorhandensein eines visuellen *Targets* (*inkongruent V*) im Vergleich zu Runden ohne *Targets* (*inkongruent ohne Target*; $t_{15} = 2.51, p = 0.024$). Keine signifikanten Unterschiede fanden sich zwischen *inkongruent T* und *inkongruent ohne Target* ($t_{15} = 1.85, p = 0.084$). Zwischen den kongruenten Kombinationen (*kongruent VT* vs. *kongruent ohne Target*) zeigten sich im t-Test signifikant schnellere Reaktionszeiten für *kongruent VT* ($t_{15} = 2.61, p = 0.02$).

T-Tests für den Vergleich der Kombinationen *kongruent* und *inkongruent* in der **Kongruenzevaluationsaufgabe** zeigten tendenziell höhere Genauigkeiten für *kongruent* ($t_{15} = 2.07, p = 0.06$) und keine Unterschiede in den Reaktionszeiten ($t_{15} = 1.36, p = 0.2$).

Ein Vergleich zwischen allen Kombinationen der **Detektionsaufgabe** und der **Kongruenzevaluationsaufgabe** zeigte keine signifikanten Unterschiede in den Genauigkeiten und Reaktionszeiten. Zwischen den kongruenten Kombinationen der **Detektions-** und **Kongruenzevaluationsaufgabe** (*kongruent VT* vs. *kongruent*; *kongruent ohne Target* vs. *kongruent*) wurden t-Tests berechnet. *Kongruent VT* hatte höhere Genauigkeiten ($t_{15} = 5.42, p < 0.01$) und schnellere Reaktionszeiten ($t_{15} = 2.32, p = 0.034$) als *kongruent*. Zwischen *kongruent ohne Target* und *kongruent* wurden keine Unterschiede in den Genauigkeiten ($t_{15} = 1.78, p = 0.096$) und Reaktionszeiten ($t_{15} = 1.38, p = 0.189$) gefunden.

Tab. 1: Verhaltensdaten zu Studie 1

Mittelwerte der Genauigkeiten (GEN, in %) und Reaktionszeiten (RZ, in ms) mit den Standardabweichungen (SD) für die Detektions- und Kongruenzevaluationsaufgabe.

Detektionsaufgabe	GEN (SD)	RZ (SD)
inkongruent T	71 (16.3)	411 (193)
inkongruent V	88.5 (9.2)	390 (194)
kongruent VT	96.2 (3.6)	376 (193)
kongruent ohne Target	83 (9.7)	436 (239)
inkongruent ohne Target	79.4 (9.3)	439 (216)

Kongruenzevaluationsaufgabe		
kongruent	87.5 (7.6)	406 (200)
inkongruent	80.4 (16.3)	417 (195)

2.3.2. EEG-Daten

Das gemittelte EKP für alle Bedingungen ist in Abbildung 6 zu sehen. In der zentralen ROI zeigte sich eine P1 bei etwa 120 ms, eine N1 bei etwa 160 ms, eine P2 bei etwa 230 ms, eine N2 bei etwa 300 ms und eine P3 bei etwa 510 ms (siehe auch Abb. 7). Dieser Verlauf war anders in den weiteren ROIs: In der rechts-posterioren ROI, die über Hirnarealen kontralateral zur visuellen Stimulation lag, war die P1 bei etwa 130 ms, die N1 bei etwa 205 ms, die P2 bei etwa 415 ms und die N2 bei etwa 500 ms zu sehen. In der links-zentralen ROI, die kontralateral zur taktilen Stimulation lag, war ein anderer Verlauf der EKP-Kurve zu sehen. Hier war nach einigen frühen Komponenten eine N1 bei etwa 125 ms und eine P2 bei etwa 190 ms zu sehen.

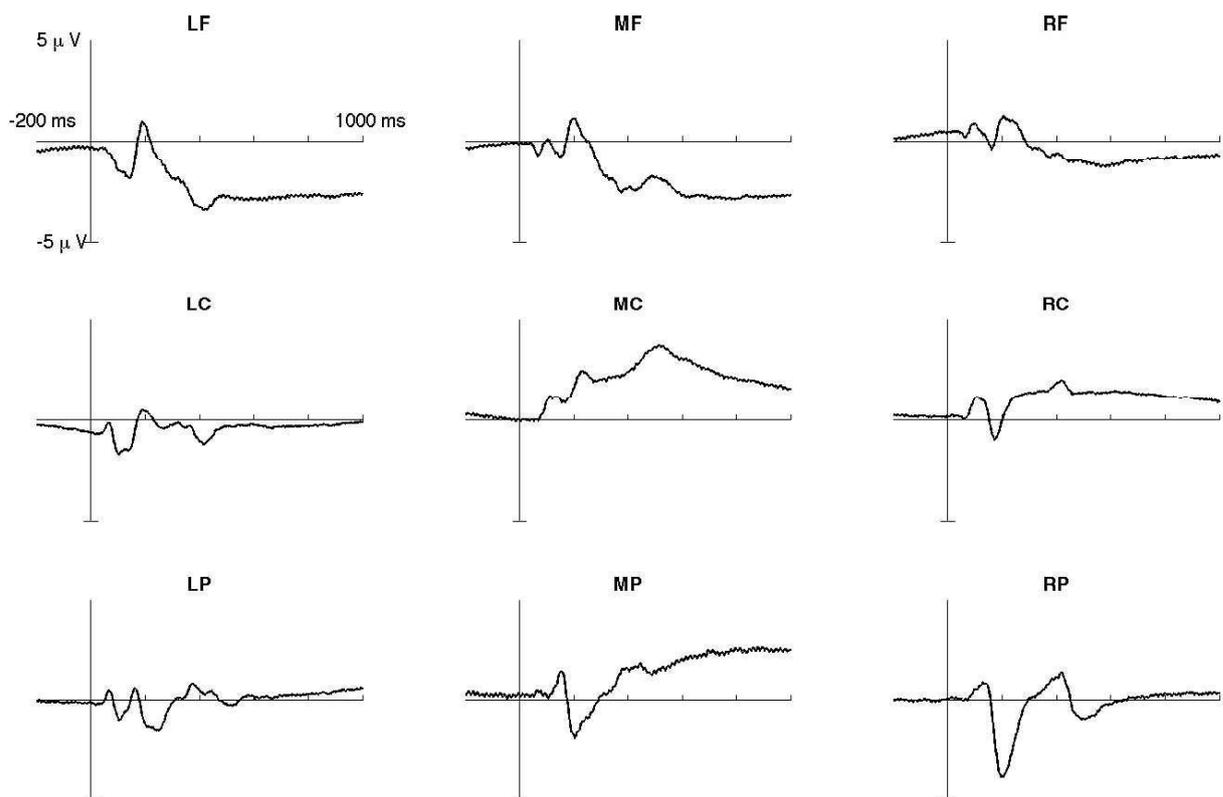


Abb. 6: Gemitteltes EKP für Studie 1

EKP (Ereignis-korrelierte-Potentiale) gemittelt über die Elektroden der neun ROIs links-frontal (LF), zentral-frontal (ZF), rechts-frontal (RF), links-zentral (LZ), zentral (Z), rechts-zentral (RZ), links-posterior (LP), zentral-posterior (ZP), rechts-posterior (RP) (siehe Abb. 4). Gemittelt wurden alle Durchgänge aller Stimulus-Kombinationen.

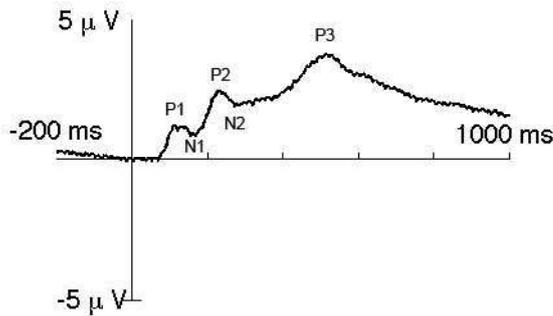


Abb. 7: Vergrößerte Darstellung des über alle Kombinationen gemittelten EKP aus Studie 1 in der zentralen ROI

EKP (Ereignis-korrelierte-Potentiale) gemittelt über die Elektroden in der zentralen ROI und über alle Kombinationen von Studie 1. Die erste positive Komponente ist mit „P1“ beschriftet, darauf folgt die erste negative Komponente „N1“. Dann folgt die zweite positive Komponente „P2“, die zweite negative Komponente „N2“ und die dritte positive Komponente „P3“.

Detektionsaufgabe

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Running-t-Tests exemplarisch anhand einiger Vergleiche berichtet. Es werden nicht alle berechneten Ergebnisse dargestellt, da die Cluster-Statistik die hauptsächlich zur Analyse der Daten verwendete Methode ist. Bei Vorhandensein eines *Targets* zeigten sich unterschiedliche Effekte. Mit dem Running-t-Test wurde eine größere Amplitude für *kongruent VT* im Vergleich zu *inkongruent T* im links zentralen ROI von etwa 430 bis 585 ms gefunden ($p < 0,001$) und von 500 bis 535 ms im mittleren ROI ($p < 0,001$; Abb. 8). Zwischen *kongruent VT* und *inkongruent V* wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden (Abb. 9).

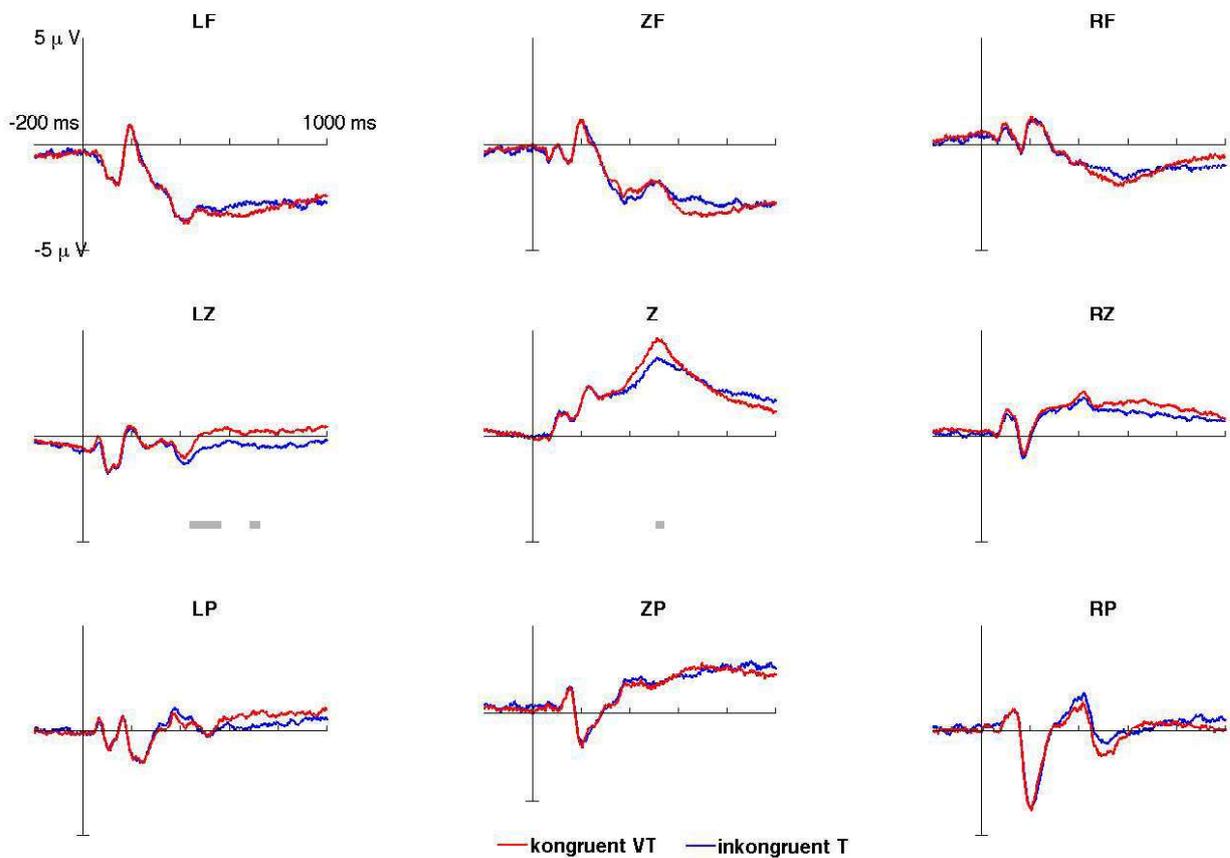


Abb. 8: EKP und Running-t-Test für den Vergleich von kongruent VT und inkongruent T

EKP (Ereignis-korrelierte-Potentiale) für *kongruent VT* (rote Linie) und *inkongruent T* (blaue Linie) aus der Detektionsaufgabe gemittelt über die Elektroden in neun ROIs. Graue Balken unterhalb der Kurven zeigen signifikante Bereiche des Running-t-Tests an ($\alpha < 0,001$ in 10 aufeinander folgenden Datenpunkten).

links-frontal (LF), zentral-frontal (ZF), rechts-frontal (RF), links-zentral (LZ), zentral (Z), rechts-zentral (RZ), links-posterior (LP), zentral-posterior (ZP), rechts-posterior (RP).

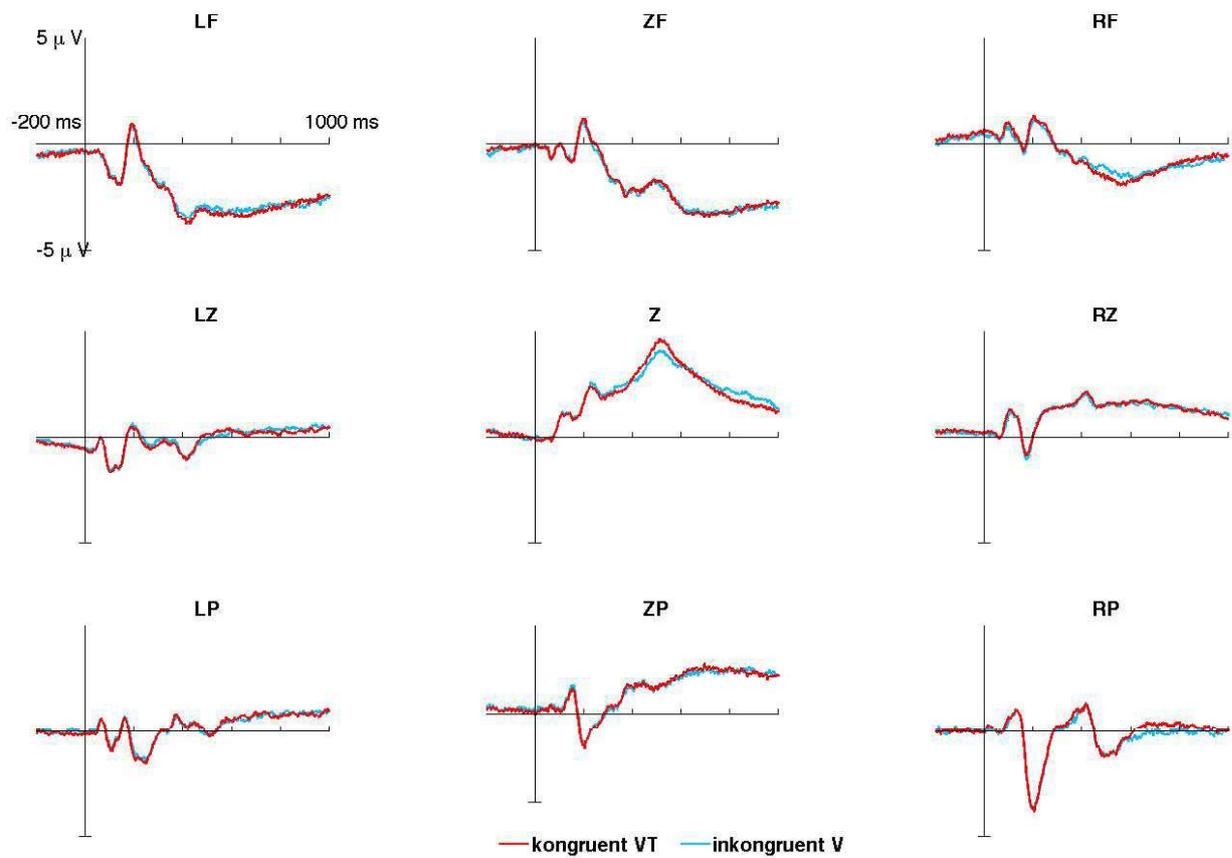


Abb. 9: EKP und Running-t-Test für den Vergleich von kongruent VT und inkongruent V

EKP (Ereignis-korrelierte-Potentiale) für *kongruent VT* (rote Linie) und *inkongruent V* (hellblaue Linie) aus der Detektionsaufgabe, gemittelt über die Elektroden in neun ROIs. Mit dem Running-t-Tests konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden ($\alpha < 0,001$ in 10 aufeinander folgenden Datenpunkten).

links-frontal (LF), zentral-frontal (ZF), rechts-frontal (RF), links-zentral (LZ), zentral (Z), rechts-zentral (RZ), links-posterior (LP), zentral-posterior (ZP), rechts-posterior (RP).

Mit der Cluster-Statistik wurde zunächst der Einfluss des Vorhandenseins eines *Targets* geprüft. Bei Vorhandensein eines taktilen *Targets* wurde für *inkongruent T* im Vergleich zu *inkongruent ohne Target* ein negativer Cluster von 250 bis 500 ms über zentralen bis links frontal gelegenen Elektroden ($p = 0.003$) gefunden. Für diesen Zeitraum zeigte sich in der Quellenlokalisierung (ohne FDR-Korrektur) eine stärkere Aktivität für *inkongruent ohne Target* im orbitofrontalen Kortex (OFC) und im subgenualen Kortex. Zwischen 550 und 800 ms zeigte sich zudem ein negativer Cluster über rechts frontalen Elektroden ($p = 0.009$). Hier wurde ohne FDR-Korrektur eine stärkere Aktivität für *inkongruent ohne Target* im tertiären visuellen Kortex rechts (V3) beobachtet (Tab. 2). Bei Vorhandensein eines visuellen *Targets* wurde für *inkongruent V* im Vergleich zu *inkongruent ohne Target* ein positiver Cluster von 500 bis 1000 ms über links zentral bis posterior gelegenen Elektroden gefunden ($p = 0.0009$). Zwischen 550 und 700 ms wurde ein negativer Cluster über rechts außen bis frontal gelegenen Elektroden beobachtet ($p = 0.01$). Im Zeitraum von 500 bis 1000 ms wurden signifikant größere FDR-korrigierte Aktivitätsmaxima für *inkongruent V* in V3 rechts, im Gyrus angularis rechts (ANG) und in der Pars opercularis links gefunden (Tab. 2). Für den negativen Cluster ließen sich keine signifikanten Unterschiede auf Quellraumebene berechnen.

Dann wurde untersucht, wie sich das Vorhandensein eines visuellen und taktilen *Targets* und damit einhergehende Kongruenz auswirkten. In der Cluster-Statistik für *kongruent VT* im Vergleich zu *inkongruent T* war ein positiver Cluster ab 400 ms über zentralen Elektroden zu finden, der sich ab 550 ms nach links und rechts aufteilte und dann rechts bei 850 ms verschwand und links bis 1000 ms bestehen blieb ($p = 0.0009$). Zwischen 400 und 600 ms war zudem ein negativer Cluster beidseits über temporo-okzipital gelegenen Elektroden zu beobachten ($p = 0.009$, siehe Abb. 11a). Für den Zeitraum von 400 bis 1000 ms wurde für *kongruent VT* im Vergleich zu *inkongruent T* signifikant größere Werte auf Quellraumebene (FDR-korrigiert) im primär visuellen Kortex rechts (V1), in V3 rechts, im ANG rechts, im Gyrus parahippocampalis, im subgenualen Kortex und im Gyrus fusiformis gefunden. *Inkongruent T* zeigte in diesem Zeitraum eine stärkere Aktivierung im Gyrus supramarginalis (SMG) links und im somatosensorischen Assoziationskortex links (Abb. 11b, Tab. 2). Zwischen *kongruent VT* und *inkongruent V* wurden in der Cluster-

Statistik keine signifikanten Unterschiede gefunden (Tab. 2). Die Unterschiede zwischen visuellen und taktilen *Targets* wurden betrachtet. Für *inkongruent V* wurde im Vergleich zu *inkongruent T* ein positiver Cluster von 350 bis 550 ms über links zentral gelegenen Elektroden ($p = 0.01$) und ein positiver Cluster über links und rechts zentral gelegenen Elektroden von 600 bis 1000 ms ($p = 0.003$) gezeigt. Für 350 bis 550 ms wurde ein stärkeres Signal in V3 rechts bestimmt. Von 600 bis 1000 ms zeigte *inkongruent V* eine signifikant stärkere Aktivierung (FDR-korrigiert) in V3 rechts, im ANG rechts, im Gyrus parahippocampalis und im Gyrus fusiformis (Tab. 2).

Weiterhin wurde für die **Detektionsaufgabe** geprüft, wie sich Kongruenz zusätzlich zu dem Vorhandensein von *Targets* im Vergleich zu Kongruenz alleine auswirkte. Für den Vergleich *kongruent VT* und *kongruent ohne Target* ergab sich in der Cluster-Statistik ein positiver Cluster für *kongruent VT* über zentralen Elektroden von 450 bis 1000 ms, der sich im Zeitverlauf nach links und rechts aufteilte und ab 700 ms nur noch über links zentral gelegenen Elektroden zu finden war ($p = 0.0009$, siehe Abb. 12a). Über frontalen Elektroden wurde ein negativer Cluster von 400 bis 800 ms beobachtet ($p = 0.003$). Der Vergleich der Maxima der Quellenlokalisierung für 450-1000 ms ergab signifikante, FDR-korrigierte Unterschiede, die im SMG rechts und im Gyrus temporalis superior rechts eine stärkere Aktivität für *kongruent VT* zeigten (Abb. 12b, Tab. 2). Für den negativen Cluster wurden keine signifikanten Unterschiede auf Quellraumebene gefunden.

Um die Effekte von nicht aufgaben-relevanter Kongruenz in der **Detektionsaufgabe** näher zu betrachten, wurden die Durchgänge ohne *Target* herangezogen. *Kongruent ohne Target* und *inkongruent ohne Target* zeigten keine signifikanten Unterschiede in der Cluster-Statistik (Tab. 2).

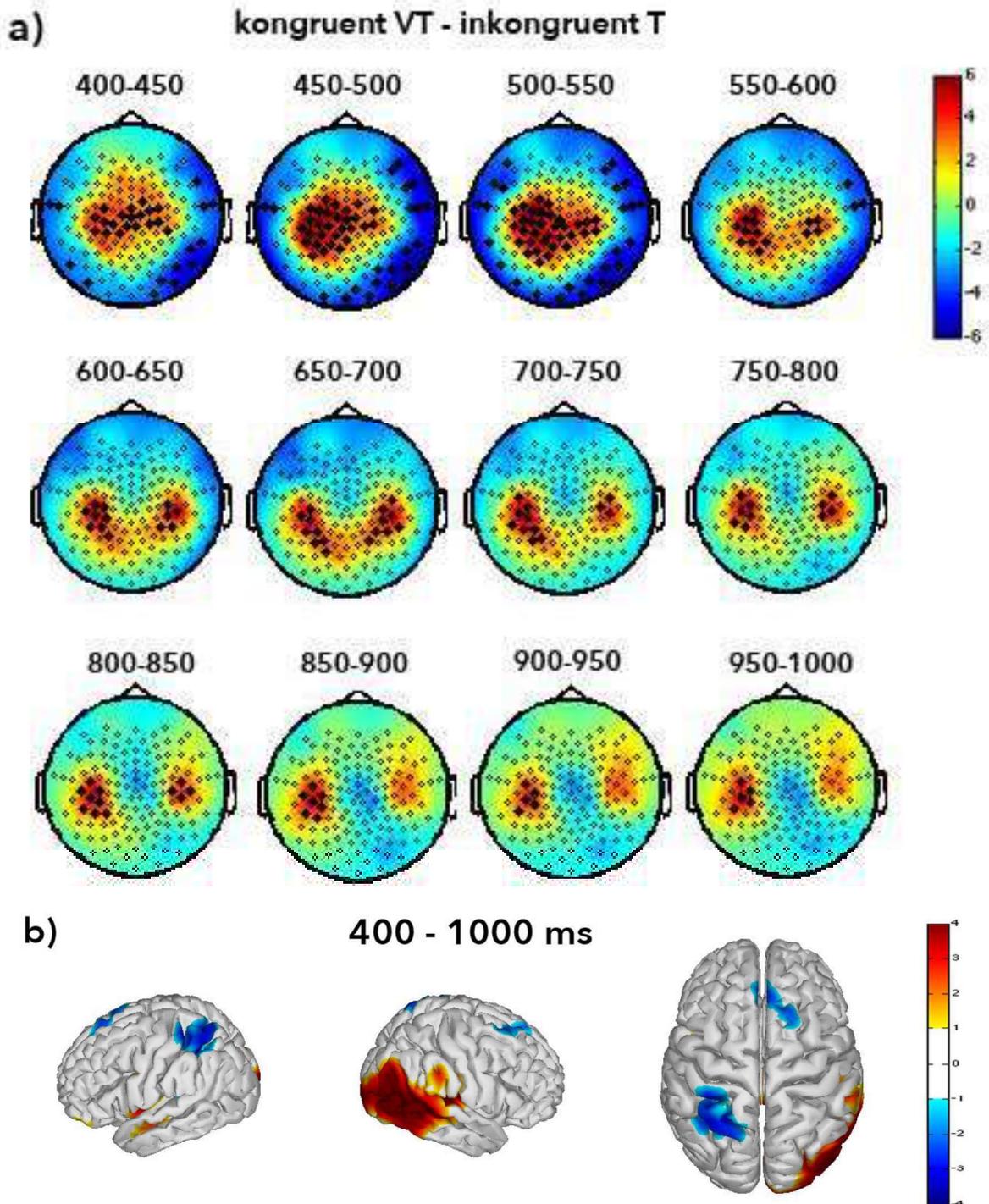


Abb. 10: Vergleich von kongruent VT und inkongruent T aus der Detektionsaufgabe.

a) Unterschiede zwischen *kongruent VT* und *inkongruent T* als Topographien (angezeigt als t-Werte) zwischen 400 und 1000 ms in 50 ms Abschnitten. Über zentralen sowie im Verlauf links und rechts parietalen Elektroden ist ein positiver Cluster ($p = 0,0009$) zu sehen. Zwischen 400 und 600 ms ist ein negativer Cluster über rechts außen und links außen gelegenen Elektroden zu sehen ($p = 0,009$). Schwarze Rauten (◆) zeigen zu signifikanten Clustern gehörige Elektroden an.

b) Statistische Unterschiede (angezeigt als t-Werte) zwischen der Quellenlokalisierung von kongruent VT und inkongruent T von 400 bis 1000 ms. T-Werte sind FDR-korrigiert ($\alpha = 0,1$) um multiple Vergleiche zu berücksichtigen. Positive Unterschiede sind primär visuellen Kortex rechts (V1), im tertiären visuellen Kortex rechts (V3), im Gyrus angularis rechts (ANG), im Gyrus parahippocampalis, im subgenualen Kortex und im Gyrus fusiformis zu finden, negative Unterschiede sind im Gyrus supramarginalis links (SMG) und im somatosensorischen Assoziationskortex links zu finden.

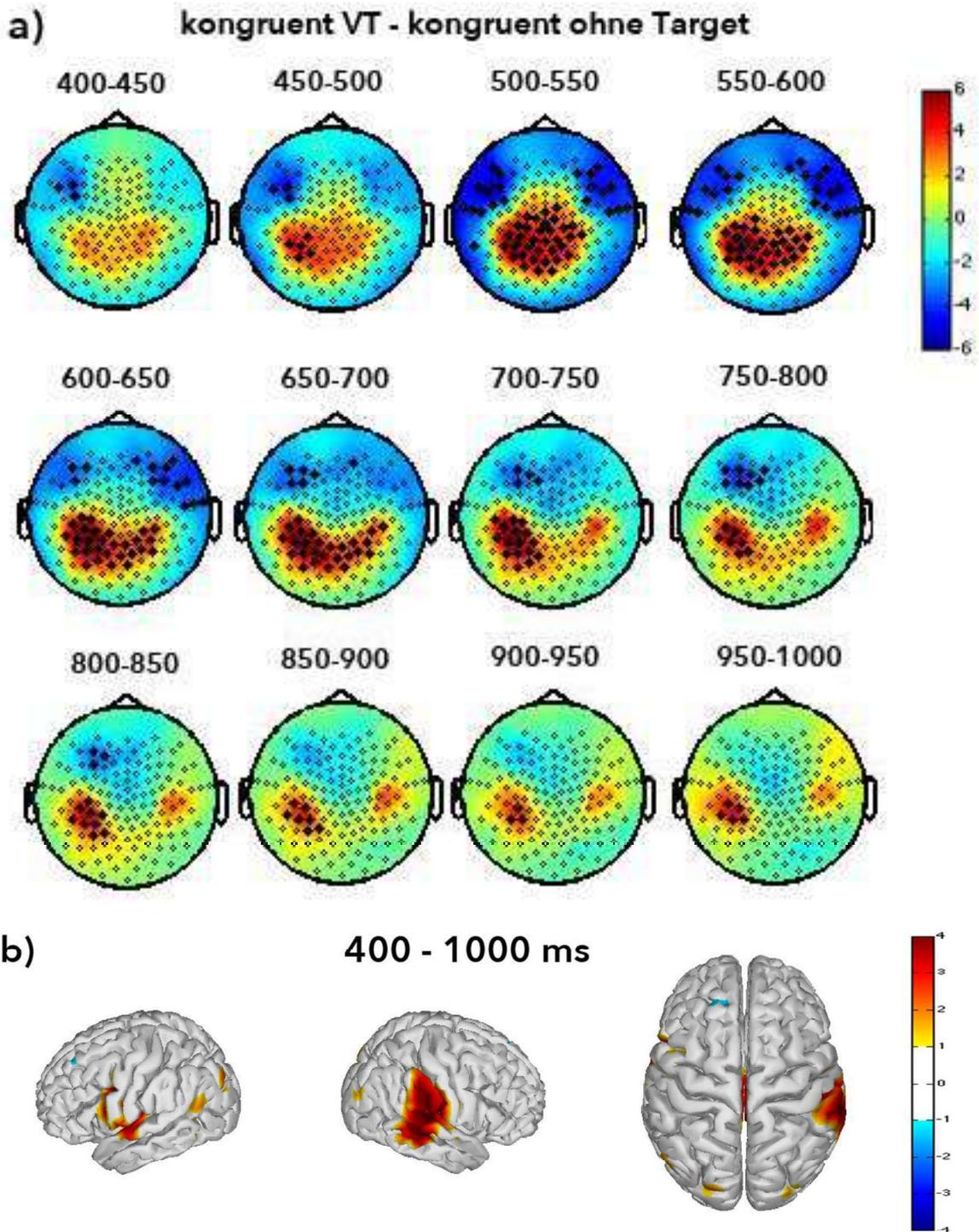


Abb. 11: Vergleich von kongruent VT und kongruent ohne Target aus der Detektionsaufgabe.

a) Unterschiede zwischen *kongruent VT* und *kongruent ohne Target* als Topographien (angezeigt als t-Werte) zwischen 400 und 1000 ms in 50 ms Abschnitten. Ein positiver Cluster ist über zentralen Elektroden von 450 bis 1000 ms zu sehen, der sich im Verlauf nach links und rechts aufteilt und ab 700 ms nur noch über links zentral gelegenen Elektroden zu sehen ist ($p = 0,0009$). Zwischen 400 und 600 ms ist ein negativer Cluster über rechts außen und links außen gelegenen Elektroden zu sehen ($p = 0,009$). Schwarze Rauten (◆) zeigen zu signifikanten Clustern gehörige Elektroden an. **b)** Statistische Unterschiede (angezeigt als t-Werte) zwischen der Quellenlokalisierung von kongruent VT und kongruent ohne Target von 400 bis 1000 ms. T-Werte sind FDR-korrigiert ($\alpha = 0,1$) um multiple Vergleiche zu berücksichtigen. Positive Unterschiede sind im Gyrus supramarginalis rechts (SMG) und im Gyrus temporalis superior rechts zu finden.

Tab. 2: Ergebnisse der Clusterstatistik und Quellenlokalisierung von Studie 1

	<u>Positiver Cluster</u>		<u>Negativer Cluster</u>	
	Cluster-Statistik (Zeitraum in ms / p- Wert)	Quellenlokalisierung	Cluster-Statistik (Zeitraum in ms / p- Wert)	Quellenlokalisierung
<u>Detektionsaufgabe</u>				
inkongruent T vs. inkongruent ohne Target	-	-	250-500 / 0.003	orbitofrontaler Kortex, subgenualer Kortex V3 rechts (ohne FDR- Korrektur)
inkongruent V vs. inkongruent ohne Target	500-1000 / 0.0009	V3 rechts, Gyrus angularis rechts, Pars opercularis links	550-700 / 0.01	-
kongruent VT vs. inkongruent T	400-1000 / 0.0009	V1 rechts, V3 rechts, Gyrus angularis rechts, Gyrus parahippocampalis, subgenualer Kortex, Gyrus fusiformis	400-600 / 0.009	somatosensorischer Assoziationskortex links
kongruent VT vs. inkongruent V	-	-	-	-
inkongruent V vs. inkongruent T	350-550 / 0.01 600-1000 / 0.003	V3 rechts V3 rechts, Gyrus angularis rechts, Gyrus parahippocampalis, Gyrus fusiformis	-	-
kongruent VT vs. kongruent ohne Target	450-1000 / 0.0009	Gyrus supramarginalis rechts, Gyrus temporalis superior rechts	400-800 / 0.003	-

Tab. 2: Fortsetzung

	<u>Positiver Cluster</u>		<u>Negativer Cluster</u>	
	Cluster-Statistik (Zeitraum in ms / p-Wert)	Quellenlokalisation	Cluster-Statistik (Zeitraum in ms / p-Wert)	Quellenlokalisation
kongruent ohne Target vs. inkongruent ohne Target	-	-	-	-
<u>Kongruenzevaluations-</u>				
<u>aufgabe</u>				
kongruent vs. inkongruent	550-1000 / 0.002	Gyrus angularis rechts, Gyrus parahippocampalis (ohne FDR-Korrektur)	550-600 / 0.01	somatosensorischer Assoziationskortex links (ohne FDR-Korrektur)
<u>Vergleich</u>				
<u>Detektionsaufgabe und</u>				
<u>Kongruenzevaluations-</u>				
<u>aufgabe</u>				
kongruent ohne Target vs. kongruent	250-600 / 0.009	-	-	-
kongruent VT vs. kongruent	300-1000 / 0.0009	V3 rechts, Gyrus supramarginalis rechts, Gyrus temporalis superior rechts	400-700 / 0.008	M1 links
inkongruent ohne Target vs. inkongruent	300-1000 / 0.0009	-	350-600 / 0.008	somatosensorischer Assoziationskortex links, V2 beidseits

Kongruenzevaluationsaufgabe

Für die **Kongruenzevaluationsaufgabe** wurden die Durchläufe mit kongruenten und inkongruenten Musterpaaren verglichen, um zu prüfen wie sich aufgabenrelevante Kongruenz auswirkte. Es zeigten sich signifikante Unterschiede im Running-t-Test in der links posterioren ROI (810-830 ms, $p < 0.001$; Abb. 10, Tab. 2).

Die Cluster-Statistik ergab einen signifikanten positiven Cluster für *kongruent* über zentralen Elektroden von 550 bis 1000 ms, der sich im Zeitverlauf nach links und posterior bewegte ($p = 0.002$; Abb. 13a, Tab. 2). Die Maxima für den Vergleich auf Quellraumbene für den besagten Zeitraum ergaben keine signifikanten FDR-korrigierten Unterschiede zwischen *kongruent* und *inkongruent*. Ohne FDR-Korrektur wurde eine stärkere Aktivität für *kongruent* im ANG rechts und im Gyrus parahippocampalis lokalisiert. Zwischen 550 und 600 ms zeigte sich ein negativer Cluster über rechts-frontalen Elektroden ($p = 0.01$; Abb. 13a, Tab. 2), für den ohne FDR-Korrektur eine stärkere Aktivität im somatosensorischen Assoziationskortex links berechnet wurde.

Vergleich der Detektionsaufgabe und der Kongruenzevaluationsaufgabe

Die Auswirkungen von Kongruenz bei den unterschiedlichen Aufgabenstellungen wurden untersucht. Es wurde untersucht, wie sich kongruente Durchgänge ohne Vorhandensein eines *Targets* in der **Detektionsaufgabe** unterschieden. *Kongruent ohne Target* aus der **Detektionsaufgabe** zeigte im Vergleich zu *kongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe** in der Cluster-Statistik einen positiven Cluster über links-zentralen und zentralen Elektroden von 250 bis 600 ms ($p = 0.009$). Für diesen Cluster zeigten sich keine signifikanten Unterschiede auf Quellraumbene (Tab. 2).

Dann wurde untersucht, wie die Unterschiede bei Vorhandensein eines *Targets* in der **Detektionsaufgabe** aussahen. *Kongruent VT* zeigte im Vergleich zu *kongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe** einen positiven Cluster von 300 bis 1000 ms über zentralen Elektroden, der sich im Zeitverlauf auf die linke und rechte Seite

aufteilte und ab 700 ms nur noch links zu finden war ($p = 0.0009$). Über links und rechts frontalen sowie posterioren Elektroden war von 400 bis 700 ms ein negativer Cluster zu finden ($p = 0.008$; Tab. 2). Die Quellenlokalisierung ergab für 300-1000 ms eine signifikant stärkere Aktivität (FDR-korrigiert) für *kongruent VT* in V3 rechts, im SMG rechts und im Gyrus temporalis superior rechts. Außerdem war in diesem Zeitraum im primär motorischen Kortex links (M1) ein größeres Potential für *kongruent* sichtbar.

Zuletzt wurden Unterschiede bei Inkongruenz in den beiden Aufgaben betrachtet. Die EKP der inkongruenten Bedingungen beider Aufgaben, *inkongruent ohne Target* aus der **Detektionsaufgabe** und *inkongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe**, wurden verglichen. Die Cluster-Statistik ergab einen signifikant positiven Cluster für *inkongruent ohne Target* über zentralen Elektroden von 300 bis 1000 ms, der sich im Zeitverlauf auf die linke und rechte Seite aufteilte und ab 650 ms nur noch links zu finden war ($p = 0.0009$). Über links und rechts frontalen sowie posterioren Elektroden war von 350 bis 600 ms ein negativer Cluster zu finden ($p = 0.008$). Der Vergleich der Quellenaktivität zeigte für diesen Zeitraum eine signifikante stärkere Aktivität (FDR-korrigiert) von *inkongruent* im somatosensorischen Assoziationskortex links, im SMG links und im sekundären visuellen Kortex (V2) beidseits (Tab. 2). Für den positiven Cluster zeigten sich keine signifikanten Unterschiede auf Quellraumebene.

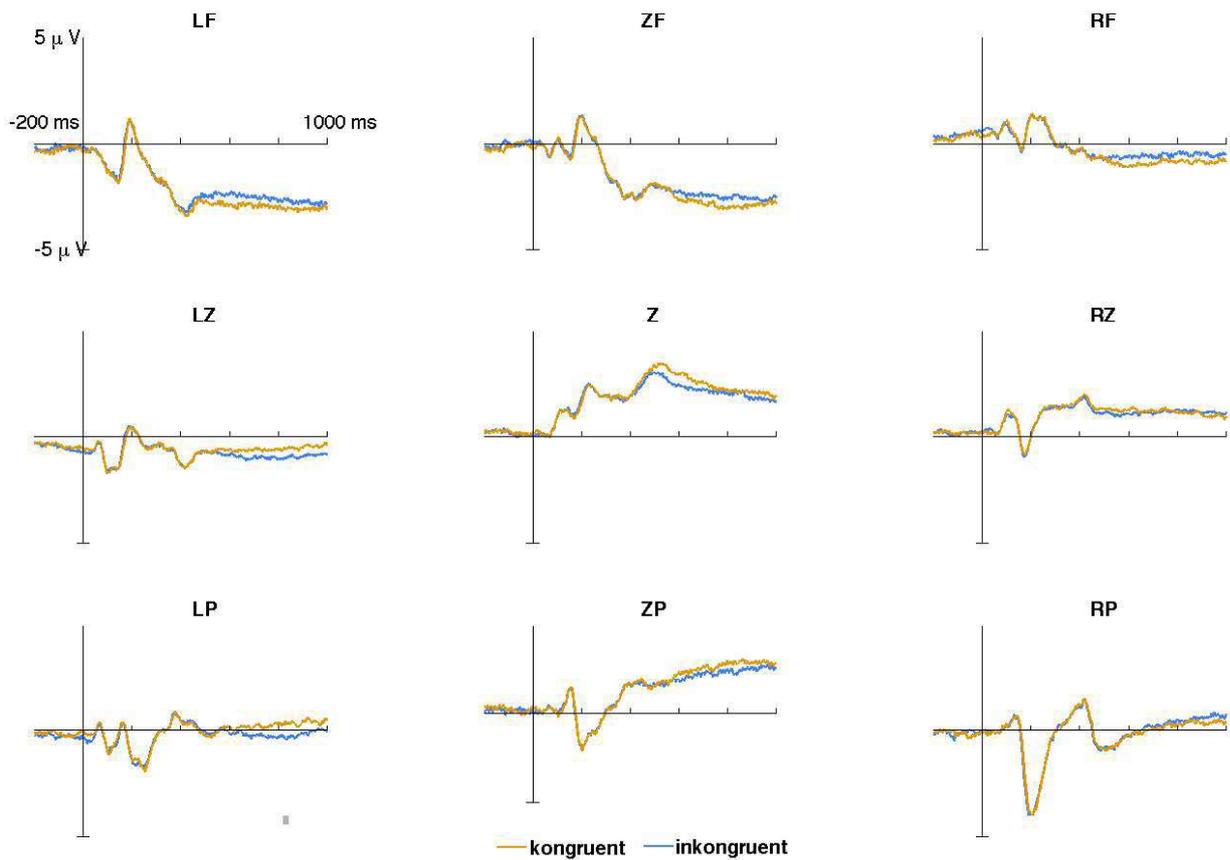


Abb. 12: EKP und Running-t-Test für den Vergleich von kongruent und inkongruent

EKP (Ereignis-korrelierte-Potentiale) für *kongruent* (gelbe Linie) und *inkongruent* (blaue Linie) aus der Kongruenzevaluationsaufgabe gemittelt über die Elektroden in neun ROIs. Graue Balken unterhalb der Kurven zeigen signifikante Bereiche des Running-t-Tests an ($\alpha < 0,001$ in 10 aufeinander folgenden Datenpunkten).

links-frontal (LF), zentral-frontal (ZF), rechts-frontal (RF), links-zentral (LZ), zentral (Z), rechts-zentral (RZ), links-posterior (LP), zentral-posterior (ZP), rechts-posterior (RP)

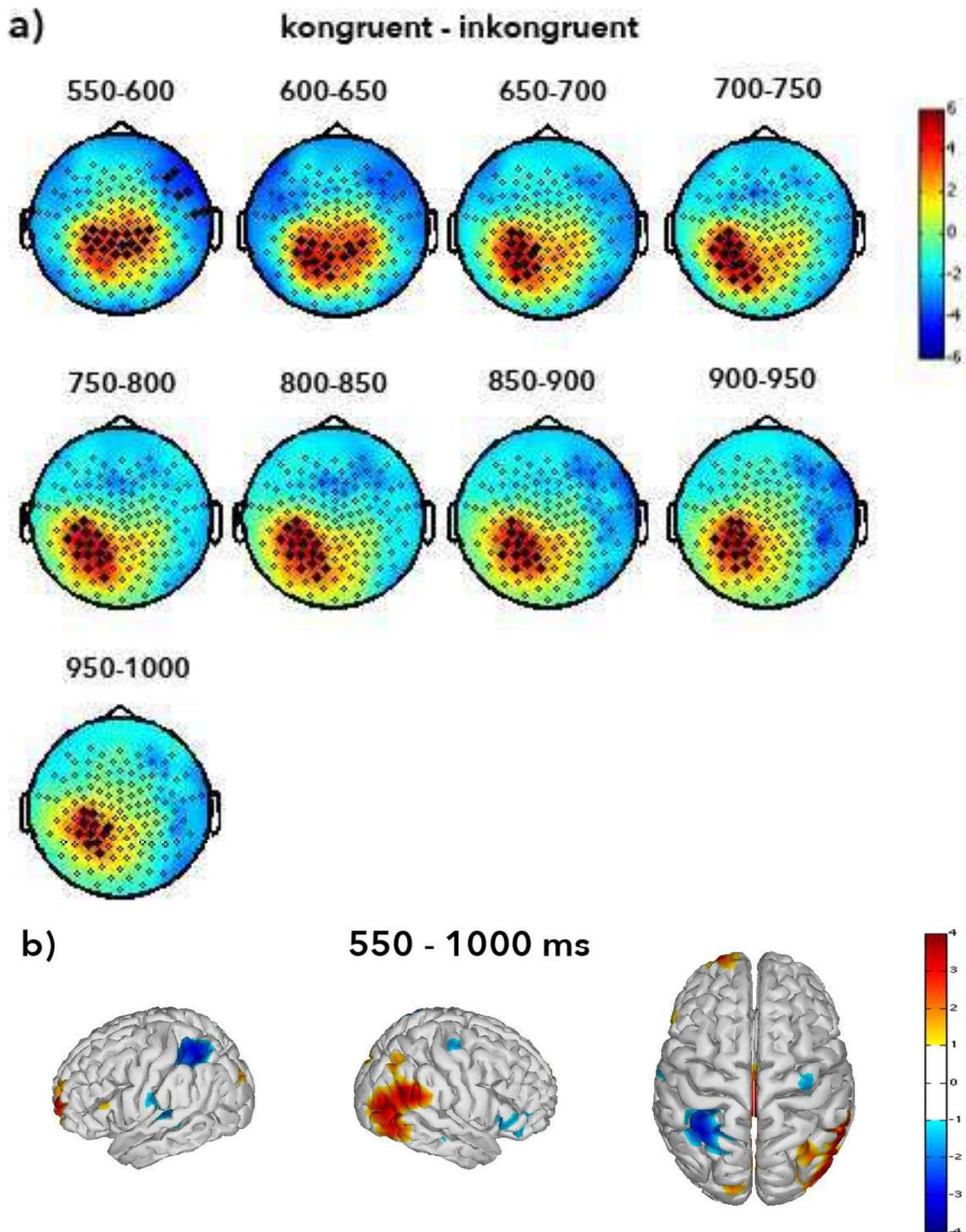


Abb. 13: Vergleich von kongruent und inkongruent aus der Kongruenzevaluationsaufgabe.

a) Unterschiede zwischen *kongruent* und *inkongruent* als Topographien (angezeigt als t-Werte) zwischen 400 und 1000 ms in 50 ms Abschnitten. Ein positiver Cluster ist über zentralen Elektroden von 550 bis 1000 ms zu sehen, der sich im Verlauf nach links und posterior bewegte ($p = 0,002$). Zwischen 550 und 600 ms zeigte sich ein negativer Cluster über rechts-frontalen Elektroden ($p = 0,01$). Schwarze Rauten (◆) zeigen zu signifikanten Clustern gehörige Elektroden an. **b)** Statistische Unterschiede (angezeigt als t-Werte) zwischen der Quellenlokalisierung von kongruent und inkongruent von 400 bis 1000 ms. T-Werte sind nicht FDR-korrigiert. Positive Unterschiede sind im Gyrus angularis rechts (ANG) und im Gyrus parahippocampalis zu finden. Negative Unterschiede sind im somatosensorischen Assoziationskortex links zu finden.

2.4. Diskussion

In dieser Studie wurde untersucht wie Kongruenz und die Aufgabenstellung den Abgleich von visuell-taktilen Mustern beeinflussen können. Es gab zwei Aufgaben, bei denen immer bimodal visuell-taktil stimuliert wurde. In der **Detektionsaufgabe** sollte ein vorgegebenes *Target* in den visuell-taktilen Musterpaaren gesucht werden, so dass hier auch das Vorhandensein eines *Targets* Einfluss haben konnte. In der **Kongruenzevaluationsaufgabe** sollte beurteilt werden, ob die visuell-taktilen Musterpaare kongruent waren. Es wurde das EEG gemessen und die EKP berechnet. In den Verhaltensdaten konnte bereits gezeigt werden, dass es bei Kongruenz der visuellen und taktilen Muster zu besseren Genauigkeiten und schnelleren Reaktionszeiten kam (Göschl, Friese, Daume, König, & Engel, 2015). Die Analyse der EKP zeigte nun, dass die Detektion visueller *Targets* und kongruenter visuell-taktiler *Targets* (**Detektionsaufgabe**) im Vergleich zu Durchgängen ohne *Target*, zu größeren Amplituden über zentralen und links parietalen Elektroden ab etwa 400-500 ms führte. Sollte die Kongruenz der Stimuli evaluiert werden (**Kongruenzevaluationsaufgabe**), so konnten größere EKP-Amplituden für kongruente Stimuli über zentralen und links parietalen Elektroden ab 550 ms beobachtet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen im Folgenden nur die Ergebnisse der Cluster-Statistik näher besprochen werden.

Detektionsaufgabe

In der **Detektionsaufgabe** wurden zwei Faktoren untersucht, die zu einer Modulation der EKP führen könnten. Dies waren das Vorhandensein eines *Targets* und die Kongruenz zwischen den visuellen und taktilen Stimuli. Um den Einfluss dieser Faktoren näher differenzieren zu können, wurden entsprechende Vergleiche berechnet.

Zur Untersuchung des Einflusses eines taktilen *Targets* wurden *inkongruent T* und *inkongruent ohne Target* verglichen. Gleiches wurde für ein visuelles *Target* mit dem Vergleich *inkongruent V* und *inkongruent ohne Target* untersucht. Ein Effekt durch zwei *Targets* wurde durch den Vergleich *kongruent VT* mit *kongruent ohne Target*

untersucht. Dann wurde geprüft, wie sich Kongruenz in der **Detektionsaufgabe** auswirkte. Untersucht wurden Kombinationen mit *Targets* (*kongruent VT* vs. *inkongruent V* und *kongruent VT* vs. *inkongruent T*) auf den Effekt von Kongruenz und Kombinationen ohne *Targets* (*inkongruent ohne Target* vs. *kongruent ohne Target*). Bei der **Kongruenzevaluationsaufgabe** wurde der Effekt von aufgabenrelevanter Kongruenz (*kongruent* vs. *inkongruent*) untersucht. Zuletzt wurden Unterschiede zwischen den Aufgaben betrachtet.

Bei Vorhandensein von taktilen *Targets* ohne zusätzliche Kongruenz zeigten sich keine Unterschiede im EKP oder in den Reaktionszeiten im Vergleich zu *inkongruent ohne Target* (*inkongruent T* vs. *inkongruent ohne Target*). Die Genauigkeiten für *inkongruent T* waren lediglich tendenziell höher als für *inkongruent ohne Target*. Für taktile *Targets* sind jedoch Effekte in den EKP in Form einer größeren parietalen P3 bekannt, die zum Teil auf Prozessen im temporoparietalen Kortex beruhen (Yamaguchi & Knight, 1991). Es lassen sich unterschiedliche Gründe vermuten, warum in Studie 1 keine Effekte für ein taktilen *Target* zu finden waren. Im Vergleich zu Studie 1 wurde bei Yamaguchi und Knight nur taktil und in anderer Weise stimuliert - taktile Stimuli waren hier eine mechanische Berührung unterschiedlicher Finger anstatt unterschiedliche räumliche Punktemuster. Zudem traten die *Targets* seltener auf (12 % statt 25 %). Unterschiede in der Auffälligkeit und der Detektionsschwierigkeit der *Targets* in beiden Studien könnten zu den geringeren Effekten bei Vorhandensein von taktilen *Targets* in Studie 1 beigetragen haben. Zudem gibt es Hinweise, dass die Detektion taktiler Stimuli durch eine multisensorische Umgebung beeinflusst werden kann und geringere Effekte bei *Targets* zeigen kann als bei unimodaler Stimulation. So haben Wang et al. (2012) die Detektion von visuellen und taktilen *Targets* untersucht (auch auditorische Stimuli wurden benutzt, diese sollen hier jedoch nicht betrachtet werden). Für jede Modalität wurden *Targets* vorgegeben, die dann bei unimodaler oder bimodaler Stimulation entdeckt werden sollten. Dann wurden die EKP von unimodal und bimodal vorhandenen, visuellen oder taktilen *Targets* verglichen. Die P3 war für bimodale und unimodale visuelle *Targets* gleich, jedoch für bimodale taktile *Targets* kleiner als für unimodale. Die multisensorische Stimulation könnte also die Effekte für taktile *Targets*, die in den Genauigkeiten angedeutet wurden, vermindert haben.

Bei Vorhandensein von visuellen *Targets* (*inkongruent V* vs. *inkongruent ohne Target*) zeigte sich über links parietalen Elektroden ein positiver Cluster ab 500 ms, der Quellen in V3 rechts und im prämotorischen und supplementär motorischen Kortex links hatte. Zudem gab es signifikante Unterschiede in den Genauigkeiten und Reaktionszeiten. Effekte bei der Detektion visueller *Targets* sind bekannt und gut beschrieben für *oddball*-Paradigmen (Paradigmen mit „Sonderlingen“). Hier sind die visuellen *Targets* besonders selten oder haben eine auffällige Form oder Farbe und stechen damit besonders hervor. Visuelle *Targets* führen klassischerweise zu größeren P3-Komponenten besonders an zentralen Elektroden (Azizian, Freitas, Watson, & Squires, 2006; Comerchero & Polich, 1999; Strüber & Polich, 2002). Die P3 ist moduliert durch eine Vielzahl an Prozessen. Dabei ist die P3 kein Merkmal der bewussten Wahrnehmung von Stimuli, sondern der auf die Wahrnehmung der Stimuli folgenden Verarbeitung (Pitts, Padwal, Fennelly, Martínez, & Hillyard, 2014). Dazu gehören Prozesse wie die Initiierung einer Antwort und Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses (Kok, 2001). In der vorliegenden Studie zeigten sich signifikant höhere Genauigkeiten bei visuellen als bei taktilen *Targets*, so dass die Einordnung eines visuellen Stimulus als *Target* einfacher zu sein scheint. Es lässt sich vermuten, dass die einfachere Einordnung der visuellen Stimuli als *Target* Einfluss auf die P3 gehabt haben könnte. Es zeigt sich häufig eine größere P3 bei einfacheren Aufgaben, wie zum Beispiel der Einordnung von einfachen visuellen Stimuli als *Target* in einer *Oddball*-Aufgabe im Vergleich zu schweren visuellen Stimuli (Kim, Kim, Yoon, & Jung, 2008). Ist die Einordnung eines Stimulus als *Target* einfacher, so ist zudem die Sicherheit einer richtigen Kategorisierung und der dann folgenden Initiierung einer Antwort größer – ein weiterer Faktor der die P3 modulieren kann (Selimbeyoglu, Keskin-Ergen, & Demiralp, 2012). Zudem lässt sich vermuten, dass die einfacher als *Target* einzuordnenden visuellen Stimuli in *bottom-up*-Weise die Aufmerksamkeit gelenkt haben könnten. Die Aufmerksamkeit sollte immer auf alle Stimuli gerichtet werden, könnte jedoch entsprechend auf visuelle *Targets* gelenkt worden sein, wodurch mehr Verarbeitungsressourcen ausgerichtet wurden. Dies könnte die auf die Wahrnehmung der Stimuli folgenden beschriebenen Prozesse verstärkt haben. Insgesamt ist also von einem Zusammenspiel verschiedener Faktoren auf den Effekt visueller *Targets* auszugehen.

Als nächstes sollen die Unterschiede durch das gleichzeitige Vorhandensein eines visuellen und taktilen *Targets* besprochen werden. Es zeigten sich signifikant größere EKP ab 400 ms über zentralen Elektroden und höhere Genauigkeiten sowie schnellere Reaktionszeiten für *kongruent VT* als für *inkongruent T*. Für *kongruent VT* zeigten sich im Vergleich zu *inkongruent V* höhere Genauigkeiten, aber keine signifikanten Modulationen des EKP oder Effekte in den Reaktionszeiten. Im Vergleich *kongruent VT* mit *kongruent ohne Target* wurde ein größeres EKP für *kongruent VT* ab 400 ms über zentralen Elektroden gefunden. Bei *kongruent VT* waren auch die Genauigkeiten höher und die Reaktionszeiten schneller als bei *kongruent ohne Target*. Es zeigt sich also, dass das zusätzliche Vorhandensein eines taktilen *Targets* zusammen mit dem visuellen (*kongruent VT*) den schon beschriebenen Effekt durch visuelle *Targets* (*inkongruent V*) nicht wesentlich verstärkt. Lediglich die Genauigkeiten für *kongruent VT* waren signifikant größer. Die Effekte durch das zusätzliche Vorhandensein eines visuellen *Targets* (*kongruent VT*) zu einem taktilen *Target* allein (*inkongruent T*) waren hingegen deutlicher. Am deutlichsten war der Effekt durch zwei *Targets* bei *kongruent VT* verglichen mit *kongruent ohne Target*. Diese Beobachtungen werden zusammen mit dem Vergleich von *inkongruent V* und *inkongruent T* betrachtet. Hier zeigten sich größere Amplituden für visuelle *Targets* in zentralen und links parietalen Regionen ab 350 ms und signifikante Unterschiede in den Genauigkeiten. Diese Vergleiche zeigen, dass die in den EKP beobachteten Modulationen durch das Vorhandensein eines visuellen *Targets* zu entstehen scheinen. Ein zweites *Target* bewirkte nur Veränderungen in den gemessenen Verhaltensdaten. Dies ist erstaunlich, da eine Modulation des EKP durch das Vorhandensein von zwei *Targets* im Vergleich zum Vorhandensein nur eines *Targets* schon in einer anderen Studie gezeigt werden konnte. Barutchu et al. (2013) konnten eine größere P3 bei *Targets* in der visuellen und in der auditorischen Modalität finden, verglichen zu *Targets* in nur einer Modalität. Die dezenten Effekte durch Vorhandensein von zwei *Targets* in Studie 1 könnten jedoch durch die starken Effekte bei Vorhandensein eines visuellen *Targets* und die fehlenden Effekte bei Vorhandensein eines taktilen *Targets* erklärt werden. So könnte ein taktiler *Target* den beschriebenen visuellen *Targeteffekt* nicht wesentlich verstärkt haben, da bereits das visuelle *Target* einen sehr starken *Targeteffekt* erzeugt hatte. Möglicherweise hätten die Unterschiede zwischen Vorhandensein von einem oder zwei *Targets*

durch visuelle und taktile Stimuli mit vergleichbarer Schwierigkeit näher differenziert werden können. Bei Erstellung der Stimuli wurde bereits versucht, die Schwierigkeit der visuellen Stimuli zu erhöhen, indem sie vor einem verwaschten Hintergrund und verkleinert dargestellt wurden. Wie bereits beschrieben, zeigten sich jedoch höhere Genauigkeiten für visuelle Stimuli als für taktile (Göschl et al., 2014).

Nun muss bedacht werden, dass neben dem Vorhandensein von zwei *Targets* bei *kongruent VT* noch Kongruenz zwischen den Stimuli hinzukam. In der **Detektionsaufgabe** war Kongruenz nicht aufgabenrelevant. Wie bereits dargestellt, zeigten sich im Vergleich der EKP von *kongruent VT* keine signifikanten Unterschiede zu *inkongruent V*. Dies könnte an der fehlenden Aufgabenrelevanz von Kongruenz liegen. Es lässt sich jedoch vermuten, dass Kongruenz trotzdem nicht ohne Effekt blieb, denn in der Analyse der Verhaltensdaten zeigten sich signifikante Effekte in den Genauigkeiten und Reaktionszeiten bei Kongruenz, die bereits in der vorhergehenden Verhaltensstudie gezeigt werden konnten (Göschl et al., 2014). Kongruenzeffekte in den EKP bei multisensorischer Integration sind in einer Vielzahl von Modalitäten und Paradigmen beschrieben. Kongruenz zwischen Stimuli, sei es räumlich, zeitlich oder in anderer Form, kann die Verarbeitung beeinflussen (Donohue, Todisco, & Woldorff, 2013; Meyer, Harrison, & Wuerger, 2013). Die besondere Form der in Studie 1 untersuchten Kongruenz in Form von Übereinstimmung von Punktemustern wurde bislang nicht in einer EKP-Studie untersucht, so dass nicht klar ist, in welcher Weise und zu welchem Zeitpunkt eine Modulation der EKP zu erwarten war. Die Analyse der Oszillationen der hier vorgestellten EEG-Daten (Göschl et al., 2015) zeigte eine höhere Signalstärke im Beta-Band (13-30 Hz) von 700 bis 1200 ms für *kongruent VT* verglichen zu *inkongruent V* und *inkongruent T*. Dies wurde als Hinweis auf eine stärkere sensorische Evidenz zur Entscheidungsfindung bei kongruenten Stimuli interpretiert. Da es keine Unterschiede in der Signalstärke zwischen *inkongruent V* und *inkongruent T* gab, wurde vermutet, dass die beobachteten Unterschiede zu *kongruent VT* tatsächlich auf multisensorische Kongruenzeffekte zurück zu führen sind und nicht nur durch Unterschiede in der Schwierigkeit der Detektion visueller und taktiler *Targets* zu erklären sind. Es ist also zu vermuten, dass Kongruenzeffekte in den EKP auch in einem eher späten Zeitabschnitt des Messzeitraums zu finden

sein könnten. Zu bedenken ist auch der deutliche Effekt durch visuelle *Targets*, so dass Kongruenzeffekte vielleicht durch Interaktionen mit diesem Effekt innerhalb des EKP nicht abzugrenzen waren.

Schließlich ist zu überlegen, warum die zuvor beschriebenen Effekte durch Kongruenz in Durchgängen ohne *Target* (*kongruent ohne Target* vs. *inkongruent ohne Target*) nicht zu finden waren. Hier konnten selbst in den Verhaltensdaten keine Unterschiede gefunden werden. Kongruenz wurde somit scheinbar nur in Anwesenheit von *Targets* zu einem Einflussfaktor. Dies könnte ein weiterer Hinweis für Interaktionen von *Target*- und Kongruenzeffekten sein. Es lässt sich vermuten, dass nach Einordnung der Stimuli als *Targets* Kongruenz früher wirken konnte als ohne *Targets*. Der Abgleich der visuellen und besonders der taktilen, schwerer zu verarbeitenden Stimuli mit dem vorgegebenen *Target* könnte so viel Aufmerksamkeit und Ressourcen beansprucht haben, dass eine frühe Wirkung von Kongruenz als nicht-aufgabenrelevante Eigenschaft der präsentierten Stimuli nicht auftrat. Erst nachdem die Entdeckung von zwei *Targets* in *bottom-up*-Weise Aufmerksamkeit erregt hatte, wurden die entsprechenden Verarbeitungsressourcen auf die Stimuli gelenkt und Kongruenz wurde wirksam. *Non-Targets* hingegen könnten weniger Aufmerksamkeit erregt haben, so dass nach der Einordnung der Stimuli als *Non-Target* weniger Verarbeitungsressourcen auf die Stimuli gerichtet wurden. Somit wurde Kongruenz vielleicht erst in einem späteren, hier nicht mehr gemessenen Zeitraum zu einem Einflussfaktor. In einer Studie zu Objekterkennung mit visuellen und auditorischen Stimuli konnten auch Molholm et al. (2004) bestimmte multisensorische Kongruenzeffekte nur für als *Target* definierte Stimuli beobachten, was zusätzlich für eine Interaktion von Kongruenz- und *Targeteffekten* spricht.

Kongruenzevaluationsaufgabe

Die Cluster-Statistik der *kongruenten* und *inkongruenten* Kombinationen der **Kongruenzevaluationsaufgabe** zeigte Unterschiede über zentralen und links-parietalen Elektroden ab 550 ms. Dies kann noch als eine späte Modulation der P3 interpretiert werden und tritt später auf als die P3-Modulation bei Vorhandensein visuell-taktiler *Targets* in der **Detektionsaufgabe**. In den Verhaltensdaten gab es keine signifikanten Unterschiede. In der Verhaltensstudie von Göschl et al. (2014) zeigte sich jedoch eine signifikant bessere Leistung bei der Evaluation kongruenter Stimuli als bei inkongruenten Stimuli (analysiert mit dem *inverse efficiency score*, bei dem Reaktionszeiten und Fehler-Raten miteinander kombiniert werden). Es lässt sich also vermuten, dass auch in Studie 1 ein Effekt durch Kongruenz vorhanden war, dieser sich jedoch in den EKP nicht deutlich abbildete. Interessant sind in der Studie von Göschl et al. (2014) auch die Reaktionszeiten, da hier eine möglichst schnelle Antwort direkt nach der Stimuluspräsentation und ohne ein Warteintervall gegeben werden sollte. Diese lagen bei der Kongruenzevaluationsaufgabe bei kongruenten Stimuli im Mittel bei 1406 ms und bei inkongruenten Stimuli bei 1516 ms (für die *match as target* Gruppe bei der kongruente Stimuli als *Target* definiert wurden. Für weitere Informationen siehe Göschl et al. (2014)). Zum Vergleich dient die *divided visuotactile attention* Aufgabe dieser Studie. Bei dieser Aufgabe wurde das vorgegebene Target in den visuellen und taktilen Stimuli gesucht. Die Reaktionszeiten für ein visuelles *Target* bei kongruenten Stimuli lagen bei 912 ms und bei inkongruenten Stimuli bei 1031 ms. Für ein taktilen *Target* und kongruente Stimuli wurde eine Reaktionszeit von 912 ms und bei inkongruenten Stimuli von 1364 ms bestimmt. Dies zeigt, dass hier die direkte Evaluation von Kongruenz zu langsameren Reaktionszeiten zu führen scheint, was zu den eher spät auftretenden Modulationen des EKP in Studie 1 passen würde. Insgesamt könnte diese längere Zeitdauer für die Evaluation von Kongruenz dadurch erklärt werden, dass hier auf die Prozesse in den primärsensorischen Kortices noch weitere, zeitaufwändigere Prozesse folgen mussten. Die Anordnung der Punkte zu einem Muster musste identifiziert werden und dann mit dem Muster der anderen Modalität abgeglichen werden. Und auch wenn diese Prozesse anscheinend mehr Zeit in Anspruch

nehmen können, so zeigten sich doch bessere Leistungen bei der Evaluation kongruenter Stimuli.

Bislang ist keine vergleichbare EKP-Studie bekannt, die Kongruenz von visuell-taktilen Stimuli in ihrer äußeren Form untersucht hat. Vorrangig wurde bisher die räumliche Lage als Einflussfaktor betrachtet (siehe Unterkapitel 1.3). Zum Einfluss anderer Arten von Kongruenz gibt es eine Reihe von Studien, die unter anderem audio-visuelle EKP untersucht haben (Meyer, Harrison, & Wuerger, 2013; Proctor & Meyer, 2011; Schneider, Debener, Oostenveld, & Engel, 2008). Bei unterschiedlichen Sinnesmodalitäten und Untersuchung verschiedener Formen von Kongruenz lässt sich aus diesen Arbeiten noch keine auf die vorliegende Studie übertragbare Theorie aufstellen. Insgesamt ist noch zu klären, welche Effekte in EKP bei Kongruenz der äußeren Form von visuell-taktilen Stimuli typisch sind, so dass die vorliegende Studie nur erste Hinweise geben kann.

Vergleich der **Detektionsaufgabe** und der **Kongruenzevaluationsaufgabe**

Der Einfluss der Aufgabenstellung auf die Verarbeitung von Kongruenz zwischen der **Detektionsaufgabe** und der **Kongruenzevaluationsaufgabe** wurde untersucht durch den Vergleich der kongruenten und inkongruenten Kombinationen beider Aufgaben. Im Vergleich von *kongruent VT* aus der **Detektionsaufgabe** mit *kongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe** zeigte sich der bereits beschriebene *Targeteffekt* aus der **Detektionsaufgabe** im Bereich der P3. Um die Effekte durch vorhandene *Targets* nicht mit einfließen zu lassen, wurden anschließend *kongruent ohne Target* aus der **Detektionsaufgabe** und *kongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe** verglichen. Es zeigte sich ein Unterschied über links zentralen Elektroden zwischen 250 und 600 ms mit einem positiven Cluster für *kongruent ohne Target* aus der **Detektionsaufgabe** (Tab. 2). In ähnlicher Weise zeigte sich auch für die inkongruente Kombination der **Detektionsaufgabe** (*inkongruent ohne Target*) ein positiver Cluster von 300 bis 1000 ms über zentralen Elektroden für den Vergleich mit der inkongruenten Kombination (*inkongruent*) der **Kongruenzevaluationsaufgabe**. Dies weist darauf hin, dass in diesem Zeitraum bei gleichen Stimuli Prozesse stattfanden, die aufgabenspezifisch waren. Bei der

Detektionsaufgabe mussten nach der Stimulation die Punktemuster erkannt und dann mit dem im Gedächtnis vorhandenen *Target* verglichen werden. In der **Kongruenzevaluationsaufgabe** hingegen mussten beide Punktemuster erkannt und dann miteinander verglichen werden. Dies könnte auf Prozesse im Arbeitsgedächtnis hinweisen, da in der Detektionsaufgabe über einen Block hinweg ein *Target* erinnert werden musste. Studien zu multisensorischer Integration und dem Arbeitsgedächtnis mit Messung von EKP sind rar. Xie et. al (2017) haben EKP bei visuell-auditorischen Stimuli gemessen. Die Stimuli waren Bilder von Objekten und die entsprechenden Objektnamen. Es wurde ein visuelles, ein auditorisches oder ein visuell-auditorisches Objekt vorgegeben und dann mit den folgenden Stimuli abgeglichen, die nur visuell bei einem visuellen und visuell-auditorischem Objekt und nur auditorisch bei einem auditorischen Objekt waren. Die EKP während der Präsentation des zu merkenden Objekts wurde gemessen. Die EKP der unimodalen visuellen und taktilen Durchgänge wurden summiert und mit den EKP der bimodalen Runden mit kongruenten Stimuli verglichen. Es zeigte sich ein größeres Potential für die bimodalen kongruenten Runden zwischen 236 und 530 ms. Der eher späte Zeitraum der beobachteten Unterschiede wurde als Hinweis gewertet, dass die Stimuli zuerst in *top-down*-Weise im Arbeitsgedächtnis abgelegt werden mussten, bevor multisensorische Integration stattfand. In Übertragung auf die **Detektionsaufgabe** könnte auf einen *top-down*-Einfluss des Arbeitsgedächtnis geschlossen werden, der die Verarbeitung der Stimuli angetrieben hat um einen schnellen Abgleich mit den Targets zu erreichen. Wie schon beschrieben scheint die Evaluation von Kongruenz zwischen den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Punktemustern zeitaufwändiger zu sein als andere Formen der Kongruenz. Es ist vorstellbar, dass der *top-down*-Einfluss des Arbeitsgedächtnis diese Verarbeitung angetrieben hat und Kongruenz so in der **Detektionsaufgabe** früher einen Einfluss haben konnte als in der **Kongruenzevaluationsaufgabe**. Eine weitere Studie zu dieser Frage hat EKP beim Abgleich semantisch kongruenter oder inkongruenter visuell-auditorischer Stimuli gemessen und die Gamma-Band-Aktivität untersucht (Senkowski, Schneider, Tandler, & Engel, 2009). Auf die Präsentation eines Objektbildes folgte ein Objektgeräusch, welches kongruent oder inkongruent zu dem Objektbild sein konnte. Während der Präsentation des Objektgeräusches wurde das EEG gemessen. Es zeigte sich eine größere EKP-Amplitude und eine größere Gamma-Band-Aktivität für

die kongruenten Durchgänge ab 120 ms als Hinweis auf einen multisensorischen Abgleich der Stimuli im Arbeitsgedächtnis. Im Gegensatz zu dieser Studie wurde in Studie 1 jedoch kein expliziter Abgleich multisensorischer Stimuli im Arbeitsgedächtnis untersucht. Insgesamt lassen sich also in der **Detektionsaufgabe** Einflüsse durch das Arbeitsgedächtnis vermuten, die die Verarbeitung der visuell-taktilen Muster moduliert haben.

Zudem lassen sich Unterschiede in der Ausrichtung der Aufmerksamkeit in beiden Aufgaben vermuten. In beiden Aufgaben musste die *top-down*-Aufmerksamkeit immer auf beide Modalitäten gerichtet werden. Es ist aber zu vermuten, dass darüber hinaus wie beschrieben unterschiedliche Prozesse der Verarbeitung mehr Ressourcen erhalten haben könnten. Zudem bestand in der Detektionsaufgabe die Möglichkeit, dass das Vorhandensein eines *Targets* Aufmerksamkeit in *bottom-up*-Weise gelenkt haben könnte. Dadurch könnten sich Verarbeitungsressourcen so verlagert haben, dass andere Prozesse bevorzugt wurden.

Quellenanalyse

In der **Detektionsaufgabe** wurde bei der Detektion eines visuellen *Targets* (*inkongruent V* und *kongruent VT*) für die einzelnen Kombinationen eine stärkere Aktivierungen in V3 rechts gefunden, so dass hier von einer verstärkten Verarbeitung der als *Targets* detektierten visuellen Stimuli im visuellen System ausgegangen werden kann. V3 ist beteiligt an der Überleitung von visuellen Informationen wie Farbe und Orientierung aus den primär visuellen Regionen in parietale und temporale Regionen zur weiteren Verarbeitung (Arcaro & Kastner, 2015). Zudem zeigte sich größerer Aktivität für visuelle *Targets* und für *kongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe** im ANG rechts, einer wichtigen Schnittstelle für Informationen verschiedener Modalitäten und Verarbeitungssysteme (Seghier, 2013). Häufig wird der ANG in den posterioren parietalen Kortex (PPC) miteinbezogen, der eine wichtige Region für visuell-taktile multisensorische Integration (Pasalar, Ro, & Beauchamp, 2010) und für das Arbeitsgedächtnis multisensorischer Reize ist (Ku, Zhao, Hao, Hu, Bodner, & Zhou, 2015). Von anderen Autoren wird der ANG auch in den inferioren parietalen Kortex miteinbezogen und hier Teil eines Aufmerksamkeitssystems sein, das in *bottom-up*-Weise auf aufgabenrelevante Stimuli reagiert (Ciaramelli, Grady, & Moscovitch, 2008). Zudem bestehen vom ANG Verbindungen zum Gyrus parahippocampalis (Rushworth, Behrens, & Johansen-Berg, 2006), der als Quelle für die P3 bei Vorhandensein von visuellen *Targets* und der damit verbundenen Aktualisierung des Arbeitsgedächtnis ausgemacht werden konnte (Machado, et al., 2014). Grundsätzlich ist der Hippocampus an Lernen und Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis beteiligt (Squire & Zola-Morgan, 1991).

Für *kongruent VT* wurde im Vergleich zu anderen kongruenten Kombinationen (*kongruent ohne Target* aus der **Detektionsaufgabe**; *kongruent* aus der **Kongruenzevaluationsaufgabe**) eine stärkere Aktivität im SMG rechts beobachtet. Dies ist vereinbar mit der von Hegner et. al (2010) in einer fMRT-Studie dargestellten Aktivierung des SMG bei Wahrnehmung eines taktilen Musters. In dieser Studie wurden auch Punktemuster mit einem Braille-Stimulator an einem Finger der rechten Hand präsentiert. In jeder Runde wurden zwei Punktemuster gezeigt, woraufhin entschieden werden musste ob diese gleich waren oder nicht. Verglichen wurde mit

Runden, in denen Vibrationen des Braille-Stimulators mit unterschiedlichen Frequenzen beurteilt werden mussten. Interessant ist die Interpretation von Hegner et. al, das der SMG rechts beteiligt sein könnte an der Aufrechterhaltung des zuerst präsentierten Punktemusters im Arbeitsgedächtnis. In Studie 1 konnte dies nur für Runden beobachtet werden, in denen das taktile *Target* zusammen mit einem visuellen *Target* präsentiert wurde, also auch Kongruenz vorlag. Möglicherweise ist dies ein Zeichen für die Verlagerung von Verarbeitungsressourcen auf das Arbeitsgedächtnis taktiler Stimuli, die nur bei Lenkung der Aufmerksamkeit durch ein visuelles *Target* und durch Kongruenz stattfindet.

Einige Kombinationen zeigten in einzelnen Vergleichen Unterschiede in der Quellraum-Statistik mit Beteiligung des somatosensorischen Assoziationskortex links (*inkongruent T vs. kongruent VT; inkongruent T vs. kongruent VT; inkongruent vs. inkongruent ohne Target*). Dieser könnte als Teil des parietalen Assoziationskortex an multisensorischer visuell-taktiler Integration beteiligt gewesen sein (Ku, Zhao, Hao, Hu, Bodner, & Zhou, 2015). Allerdings ist hier aufgrund der genannten unterschiedlichsten Vergleiche von einem unspezifischen Effekt auszugehen. Anzumerken ist, dass die Lokalisation der Aktivitätsmaxima im Quellraum nicht auf der Grundlage von individuellen MRT-Daten vorgenommen wurde, sondern mithilfe von Standard-Kopfmodellen und somit die individuelle Anatomie der Versuchspersonen nicht berücksichtigt wurde.

Zusammenfassend wurde in Studie 1 in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung visuell-taktile Kongruenz unterschiedlich verarbeitet. Während beide Aufgaben eine Teilung der *top-down*-Aufmerksamkeit auf zwei sensorische Modalitäten verlangten, könnte bei der Detektionsaufgabe das Vorhandensein von Targets die Kongruenzeffekte früher auftreten lassen. Die in den EKP gefundenen Unterschiede lassen sich beschreiben als Interaktion von Kongruenz, zusätzlichen *bottom-up*-Targeteffekten und *top-down*-Einflüssen von Arbeitsgedächtnis und Aufgabenstellung.

3. Studie 2: Verhaltensstudie zum Abgleich von bilateralen visuell-taktilen Musterpaaren

Design und Versuchsaufbau: Julia Götz, Florian Göschl, Andreas K. Engel;

Datenerhebung: Julia Götz; **Bereitstellen von Analyse-Software:** Florian Göschl;

Datenanalyse: Julia Götz; **Diskussion:** Julia Götz.

3.1. Einleitung

In Studie 2 wurde das bekannte visuell-taktile Paradigma unter neuen Aspekten betrachtet. Der Versuchsaufbau lehnte sich mehr an natürliche Bedingungen an, bei denen eine Vielzahl an Reizen auftreten können und die Handposition nicht immer den anatomischen Seiten folgend ausgerichtet ist. Daher wurden die Stimuli auf beiden Seiten gleichzeitig gezeigt, also im linken und im rechten Hemifeld sowie am linken und am rechten Zeigefinger. Jeweils eine Seite wurde für den Abgleich der Muster beachtet. Dadurch konnte der Einfluss von nicht-beachteter und beachteter Kongruenz beobachtet werden. Zudem erfolgte der Abgleich mit gekreuzten Händen, so dass sich die zu beachtende Hand im kontralateralen Hemifeld befand und es zu einem Widerspruch zwischen internem und externem Referenzrahmen kommen konnte. Insgesamt war so zwischen beachteten und nicht-beachteten Stimuli, kongruenten und inkongruenten Stimuli und nicht-überkreuzter und überkreuzter Handposition zu unterscheiden.

Studien mit überkreuzten Händen wurden oft zur Untersuchung taktiler Lokalisation eingesetzt. Taktile Stimuli können in einem internen und externen Referenzrahmen eingeordnet werden. Der interne Referenzrahmen beruht auf anatomischen Grundlagen, hier wird eine Berührung auf einem bestimmten Abschnitt der Haut in einer bestimmten Region des somatosensorischen Kortex abgebildet (Disbrow, Roberts, & Krubitzer, 2000). Eine Einordnung in den externen Referenzrahmen beruht auf der Lokalisation des taktilen Stimulus im Raum (Pouget, Ducom, Torri, & Bavalier, 2002). Zur Reihenfolge der Einordnung der Stimuli und Art des Zusammenspiels der unterschiedlichen Referenzrahmen gibt es verschiedene

Erklärungen, wie von Heed und Azañón (2014) zusammengefasst. Grundsätzlich werden zur Einordnung taktiler Stimuli immer beide Referenzrahmen benutzt. Durch Konflikte zwischen dem internen und externen Referenzrahmen kann es bei Aufgaben zur taktilen Lokalisation zu schlechteren Leistungen mit überkreuzten Händen kommen. Dies kann sich in längeren Reaktionszeiten und schlechteren Genauigkeiten bei Aufgaben mit gekreuzten Händen zeigen (Shore, Spry & Spence, 2002; Yamamoto & Kitazawa, 2001). Allerdings konnte bei schwierigen Aufgabenstellungen auch ein fehlender Einfluss der Handposition gezeigt werden (Badde, Heed, & Röder, 2014). In der Studie von Göschl et al. (2014) konnte bereits der fördernde Einfluss des Abgleichs von kongruenten visuell-taktilen Mustern auf die Genauigkeiten und die Reaktionszeiten gezeigt werden. Hier zeigte sich zudem ein Einfluss von Kongruenz, auch wenn sie nicht als Teil der Aufgabe beachtet werden sollte.

Im Gegensatz zu den vielen Studien mit gekreuzten Händen war in Studie 2 keine Antwort mit Bezug auf die räumliche Lage erforderlich, wie zum Beispiel eine Taste drücken für Stimuli auf der linken Seite und eine Taste drücken für Stimuli auf der rechten Seite, sondern es wurde nur die Kongruenz der beachteten Stimuli mit einer verbalen Antwort beurteilt. Außerdem wurde multisensorische Integration zwischen zwei beachteten Stimuli beobachtet, bislang wurde mit gekreuzten Händen eher die Beachtung nur eines Stimulus betrachtet. Untersucht wurde somit auch die Interaktion zwischen multisensorischer Integration und Konflikten des taktilen Referenzrahmens. Erwartet wurden eine bessere Genauigkeit und schnellere Reaktionszeiten bei der Beachtung von kongruenten Stimuli. Bezüglich der nicht-beachteten Kongruenz konnte ein Einfluss vermutet werden, jedoch ist durch die besondere Art der hier benutzten Stimuli noch keine vergleichbare Studie bekannt, die Hinweis auf die Richtung des Effekts geben kann.

3.2. Material und Methoden

3.2.1. Versuchspersonen

Von 56 Versuchspersonen konnten 40 ein vorab durchgeführtes Training (siehe Unterabschnitt 3.2.3) bestehen und an der Studie teilnehmen, davon waren 12 weiblich. Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 20 und 30 Jahren und das mittlere Alter lag bei 24 Jahren. Die Teilnahme an der Studie wurde bezahlt und erfolgte nach informierter Einwilligung. Nach eigenen Angaben waren alle Versuchspersonen rechtshändig, hatten eine normale oder korrigiert normale Sehfähigkeit und bisher keine neurologischen oder psychiatrischen Erkrankungen. Eine Zustimmung durch die Ethik-Kommission der Ärztekammer Hamburg für die Studie lag vor.

3.2.2. Stimulusmaterial und Versuchsaufbau

In dieser Studie wurden die gleichen visuell-taktilen Stimuli genutzt wie in Studie 1. Auch der Versuchsaufbau war wie in Studie 1, abgesehen von den im Folgenden genannten Änderungen (Abb. 14). Im Unterschied zu Studie 1 wurden die taktilen und die visuellen Stimuli nun auf beiden Seiten präsentiert. Auch 2,5° rechts des Fixationskreuzes wurde auf dem Bildschirm ein Punktmuster angezeigt. Auch die Fingerbeere des linken Zeigefingers lag nun auf einem Braille-Stimulator und wurde taktil stimuliert. An beiden Fingern und auf beiden Bildschirmpositionen wurden gleichzeitig für 300 ms Muster präsentiert. Die verbalen Antworten wurden mithilfe eines Mikrophons aufgezeichnet und der Beginn der Antwort mit Presentation gemessen. Für die Detektion kongruenter Musterpaare sollten die Versuchspersonen laut und deutlich „ja, gleich“ sagen. Für inkongruent detektierte Musterpaare sollte „ja, verschieden“ gesagt werden. Beide Antworten sollten mit dem gleichen Wort beginnen, um ein unterschiedliches Ansprechen des Voicekey-Systems bei verschiedenen Lauten zu verhindern (Kessler & Treiman, 2002). Die Sensibilität des Voicekey-Mikrophons auf die Ansagen der Versuchspersonen wurde vor jedem Versuch überprüft und gegebenenfalls eine lautere Aussprache geprobt. Die

Reaktionszeiten wurden mit dem Voicekey-System und dem Programm Presentation (Neurobehavioral Systems, Version 16.3) gemessen. Da das Voicekey-System keine Spracherkennung beinhaltet, wurden die verbalen Antworten über eine Tasteneingabe durch den Versuchsleiter kodiert. Über die Einsteckkopfhörer wurde rosa Rauschen mit XX dB präsentiert, um die Geräusche der Braille-Stimulatoren zu maskieren. Zu Beginn jedes Durchgangs wurden die Versuchspersonen über einen Piepton (100 ms Dauer, 1000 Hz), der entweder auf dem linken oder dem rechten Ohr präsentiert wurde, informiert, welche Seite beachtet werden sollte.

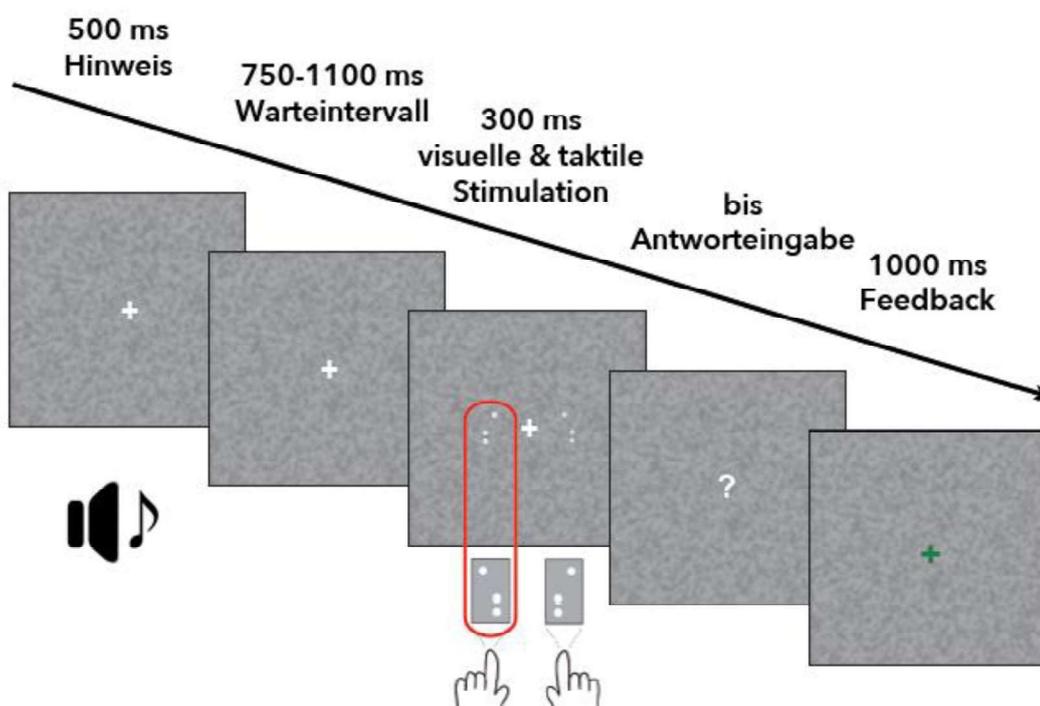


Abb. 14: Versuchsablauf von Studie 2

Ablauf eines Durchgangs. Nach einem Hinweisintervall (500 ms) mit einem Piepton (100 ms) folgte ein Warteintervall von 750-1100ms. Dann wurden die visuellen und taktilen Muster gleichzeitig präsentiert (300 ms). Bis zur verbalen Antworteingabe wurde ein Fragezeichen angezeigt. Auf die Antwort folgte ein visuelles Feedback (1000 ms) (modifiziert nach Göschl et al., 2015).

3.2.3. Trainingsablauf

Um an dem Versuch teilnehmen zu können mussten die Versuchspersonen zunächst ein Training absolvieren und dieses bestehen. Zunächst wurde eine Trainingsprozedur benutzt, bei der die Zuordnung eines taktilen Musters zu einem visuellen Muster erfolgen sollte. So sollte intuitiv erlernt werden, welche taktilen und visuellen Muster kongruent sind. Dazu wurden taktile Muster blockweise am linken oder rechten Zeigefinger präsentiert und sollten dann dem passenden von vier visuellen Mustern auf dem Bildschirm zugeordnet werden. Nach einigen Durchläufen zeigte sich jedoch, dass es den Versuchspersonen schwer fiel, mit diesem Training die taktilen Muster zu erkennen und das Training zu bestehen. Daher wurden die darauffolgenden Trainingsdurchgänge mit dem bewährten Training aus der Studie 1 durchgeführt. Dieses Training erfolgte als *delayed-match-to-sample*-Aufgabe. Es wurde abwechselnd pro Block der linke oder der rechte Zeigefinger trainiert. Zudem wurden nach jeweils zwei Blöcken die Hände überkreuzt, um damit schon im Training die Überkreuzung der Hände zu üben. Die Antwort wurde über den Knopfdruck mit dem linken beziehungsweise rechten Mittel- oder Zeigefinger auf einem Tastenmodul (Cedrus, RB-420 Model, San Pedro, USA) eingegeben. Die Kodierung der Tasten für die jeweiligen Antwortmöglichkeiten wurde für das gesamte Training ausbalanciert. Nach jeder Antworteingabe wurde auf dem Bildschirm ein grünes „+“ für eine richtige Antwort und ein rotes „-“ für eine falsche Antwort angezeigt (für jeweils 1000 ms). Ein Trainingsblock bestand aus 16 Durchgängen. Es wurden acht Musterpaare entworfen, die gezeigt wurden. Dadurch wurde jedes Muster viermal gezeigt und die Hälfte aller Musterpaare war gleich und die Hälfte war verschieden. Alle Versuchspersonen mussten mindestens fünf Trainingsblöcke durchlaufen. Das Training war bestanden, wenn in zwei aufeinander folgenden Blöcken 80 % der Antworten richtig waren. 16 Versuchspersonen haben das Training nicht bestanden und konnten nicht am Versuch teilnehmen.

3.2.4. Versuchsablauf

Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, ein visuelles und ein taktiles Muster miteinander zu vergleichen und zu entscheiden, ob sie kongruent oder inkongruent zueinander waren. Dies wurde mit ungekreuzter oder gekreuzter Handhaltung durchgeführt. Die Handhaltung wurde nach der Hälfte der Blöcke gewechselt. Die Hälfte der Versuchspersonen begann mit ungekreuzter, die andere Hälfte mit gekreuzter Handhaltung. Zu Beginn jeder Runde wurde über einen Piepton auf dem linken oder rechten Ohr die zu beachtende Seite angezeigt. Auf dieser Seite sollten die Versuchspersonen die darauffolgend präsentierten Muster vergleichen. Bei einem Piepton auf dem linken Ohr und ungekreuzter Handhaltung sollten das visuelle Muster auf der linken Bildschirmseite und das taktile Muster am linken Zeigefinger miteinander verglichen werden. Bei einem Piepton auf dem linken Ohr und gekreuzter Handhaltung sollten das visuelle Muster auf der linken Bildschirmseite und das taktile Muster am rechten Zeigefinger (der nun auf dem linken Braille-Stimulator lag) miteinander verglichen werden. So schnell wie möglich sollte dann verbal geantwortet werden. Insgesamt gab es 12 Blöcke mit jeweils 32 Runden, also insgesamt 384 Runden. Für jede Handhaltung kamen kongruente und inkongruente Musterpaare gleich oft vor. Vorab wurden vier kongruente und vier inkongruente visuell-taktile Musterpaare definiert, die alle gleich häufig vorkamen. Diese Musterpaare auf beiden Seiten wurden so miteinander kombiniert, dass es die folgenden Bedingungen gab:

- kongruent-kongruent (kongruent beachtet, kongruent unbeachtet),
- kongruent-inkongruent (kongruent beachtet, inkongruent unbeachtet),
- inkongruent-kongruent (inkongruent beachtet, kongruent unbeachtet) sowie
- inkongruent-inkongruent (inkongruent beachtet, inkongruent unbeachtet).

Für jede dieser Bedingungen gab es 96 Durchgänge. Es wurde nie auf beiden Seiten das gleiche Muster gezeigt, so dass keine Kongruenzeffekte über beide Seiten hinweg oder in einer Modalität entstehen konnten. Jeder Durchgang begann mit einem Hinweisintervall von 500 ms, das mit dem Piepton (100 ms) begann. Darauf

folgte ein Warteintervall, das zwischen 750 und 1100 ms variierte. Dann wurden die Muster für 300 ms präsentiert. Die Antwort konnte sofort eingegeben werden. Über ein 1000 ms dauerndes Feedbackintervall wurde direkt im Anschluss angezeigt, ob die Antwort richtig oder falsch war. Am Ende jedes Blockes wurde der Anteil richtiger Antworten in Prozent angegeben (Abb. 14).

3.2.5. Datenanalyse

Nur richtig beantwortet Durchgänge wurden betrachtet. Runden mit Reaktionszeiten, die unter 300 ms lagen oder über dem Mittelwert plus 2 Standardabweichungen, wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Versuchspersonen mit einer schlechteren Genauigkeit als 60% in einer oder mehreren der Bedingungen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Danach verblieben von 40 Versuchspersonen, die nach bestandenem Training am Versuch teilnahmen, die Daten von 18 Versuchspersonen. Nach Ausschluss aller falschen Antworten verblieben von diesen Versuchspersonen 81.1 % aller Durchgänge. Davon wurden weitere 5.5 % aufgrund von Reaktionszeit-Ausreißern ausgeschlossen. So verblieben insgesamt 78 % der Durchgänge. Für alle vier Bedingungen wurden zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen der Genauigkeiten und Reaktionszeiten der Versuchspersonen berechnet. Die Anzahl aller als gleich und als verschieden beantworteten Durchgänge wurden mittels eines paarweisen t-Tests verglichen, um einen Antwort-Bias zu überprüfen. Die Genauigkeiten und Reaktionszeiten wurden dann separat mit Varianzanalysen mit Messwiederholungen (*repeated measures ANOVA*) analysiert. Zunächst sollte untersucht werden, ob die beachtete Seite, also links oder rechts, einen Einfluss auf die Untersuchung von Kongruenz hatte. Für die Faktoren *beachtete Seite* (links, rechts) und *Kongruenz* (kongruent-kongruent, kongruent-inkongruent, inkongruent-kongruent, inkongruent-inkongruent) wurde eine 2 x 4 ANOVA berechnet. Dann sollte ein möglicher Einfluss der Handposition untersucht werden. Für die Faktoren *Handposition* (ungekreuzt, gekreuzt) und *Kongruenz* (kongruent, inkongruent) wurde eine 2 x 2 ANOVA berechnet. Zuletzt wurde untersucht, ob Kongruenz auf der unbeachteten Seite einen Einfluss hatte. Dafür wurde eine 2 x 2 ANOVA mit den Faktoren *Kongruenz*

(kongruent, inkongruent) und *unbeachtete Seite* (kongruent, inkongruent) berechnet. Signifikante Effekte wurden mit Post-hoc t-Tests (paarweise t-Tests) weiter analysiert.

3.3. Ergebnisse

Die Reaktionszeiten und Genauigkeiten sind Tabelle 3 zu entnehmen. Insgesamt wurde von allen Versuchspersonen zusammen in allen Durchgängen 51.5 % der Stimuli als gleich bewertet und 48.5 % als verschieden. Ein t-Test zeigte kein signifikantes Überwiegen einer Antwort an ($t_{17} = 1.33$, $p = 0.202$), so dass ein Antwort-Bias ausgeschlossen werden konnte.

Zunächst wurde untersucht, ob es Unterschiede bei kongruenten Durchgängen gab, bei denen die Aufmerksamkeit auf die linke oder rechte Seite gerichtet werden sollte. Es wurde eine 2 x 4 ANOVA für die Genauigkeiten mit den Faktoren *beachtete Seite* (links versus rechts) und *Kongruenz* (kongruent-kongruent versus kongruent-inkongruent versus inkongruent-kongruent versus inkongruent-inkongruent) berechnet. Es zeigten sich signifikant höhere Genauigkeiten für Durchgänge mit kongruenten Stimuli ($F_{3, 51} = 4.21$, $p = 0.025$). Es wurden keine signifikanten Effekte in Abhängigkeit von der *beachteten Seite* ($F_{1, 17} = 0.4$, $p = 0.84$) und für die Interaktion *Kongruenz x beachtete Seite* ($F_{3, 51} = 2.1$, $p = 0.14$) gefunden. Für die Reaktionszeiten wurde ebenso eine 2 x 4 ANOVA mit den Faktoren *beachtete Seite* (links versus rechts) und *Kongruenz* (kongruent-kongruent versus kongruent-inkongruent versus inkongruent-kongruent versus inkongruent-inkongruent) berechnet. Es wurden signifikant schnellere Reaktionszeiten für kongruente Durchgänge gefunden ($F_{3, 51} = 30.58$, $p < 0.01$). Keine signifikanten Effekte zeigten sich für die beachtete Seite ($F_{1, 17} = 0.16$, $p = 0.7$) und die Interaktion *Kongruenz x beachtete Seite* ($F_{3, 51} = 0.57$, $p = 0.6$).

Da es keine Effekte durch die beachtete Seite (links versus rechts) gab, wurden im Folgenden die Durchgänge beider Seiten gemeinsam analysiert. Es wurde betrachtet, ob die gekreuzte Handposition einen Effekt hatte. Eine 2 x 2 ANOVA für die Genauigkeiten mit den Faktoren *Handposition* (gekreuzt versus ungekreuzt) und *Kongruenz* (kongruent versus inkongruent) zeigte signifikant höhere Genauigkeiten für kongruente Durchgänge ($F_{1, 17} = 4.21$, $p = 0.025$) und keine signifikanten Effekte durch die Handposition ($F_{1, 17} = 1.12$, $p = 0.31$) und keine Interaktion durch

Kongruenz x Handposition ($F_{1, 17} = 1.43, p = 0.25$). Eine 2 x 2 ANOVA für die Reaktionszeiten mit den Faktoren *Handposition* (gekreuzt versus ungekreuzt) und *Kongruenz* (kongruent versus inkongruent) zeigte einen signifikanten Effekt für *Kongruenz* ($F_{1, 17} = 31.78, p < 0.01$). Keine signifikanten Effekte wurden für die *Handposition* ($F_{1, 17} = 0.55, p = 0.47$) und für die Interaktion *Kongruenz x Handposition* ($F_{1, 17} = 0.53, p = 0.63$) gefunden.

Da sich kein Effekt durch die Handposition zeigte, wurden ungekreuzte und gekreuzte Handpositionen in der folgenden Analyse zusammen betrachtet. Nun sollte betrachtet werden, wie sich Kongruenz auf der beachteten und unbeachteten Seite auswirkte. Eine 2 x 2 ANOVA für die Genauigkeiten mit den Faktoren *Kongruenz* und *unbeachtete Seite* ergab einen signifikanten Effekt für *Kongruenz* auf der beachteten Seite ($F_{1, 17} = 6.18, p = 0.024$). Kein signifikanter Effekt wurde für die *unbeachtete Seite* ($F_{1, 17} = 0.91, p = 0.35$) und die Interaktion *Kongruenz x unbeachtete Seite* ($F_{1, 17} = 0.95, p = 0.34$) gefunden. Post-hoc t-Tests zeigten signifikant höhere Genauigkeiten bei kongruent-kongruent als bei inkongruent-kongruent ($t_{17} = 2.32, p = 0.033$). Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich bei den Genauigkeiten zwischen kongruent-kongruent und kongruent-inkongruent ($t_{17} = 1.45, p = 0.17$), zwischen kongruent-inkongruent und inkongruent-inkongruent ($t_{17} = 1.91, p = 0.07$) und zwischen inkongruent-kongruent und inkongruent-inkongruent ($t_{17} = 0.16, p = 0.87$). Eine 2 x 2 ANOVA für die Reaktionszeiten mit den Faktoren *Kongruenz* und *unbeachtete Seite* ergab einen signifikanten Effekt für *Kongruenz* ($F_{1, 17} = 44.62, p < 0,01$). Die post-hoc t-Tests zeigten signifikant schnellere Reaktionszeiten für kongruent-kongruent als für inkongruent-kongruent ($t_{17} = 6.87, p < 0,01$) und signifikant schnellere Reaktionszeiten für kongruent-inkongruent als für inkongruent-inkongruent ($t_{17} = 5.5, p < 0,01$). Keine signifikanten Unterschiede fanden sich zwischen den Reaktionszeiten von kongruent-kongruent und kongruent-inkongruent ($t_{17} = 6.87, p = 0.24$) und inkongruent-kongruent und inkongruent-inkongruent ($t_{17} = 6.87, p = 0.66$).

Tab. 3: Verhaltensdaten zu Studie 2

Mittelwerte der Genauigkeiten (GEN, in %) und Reaktionszeiten (RZ, in ms) mit den Standardabweichungen (SD) für alle Durchgänge und nach Handpositionen aufgeteilt.

Alle Bedingungen gesamt	GEN (SD)	RZ (SD)
kongruent-kongruent	81.8 (5.9)	901 (185)
kongruent-inkongruent	79.5 (8.9)	909 (185)
inkongruent-kongruent	75.2 (10.9)	1005 (212)
inkongruent-inkongruent	75.5 (7.3)	999 (204)
Handposition		
ungekreuzt		
kongruent-kongruent	83.2 (7.7)	888 (201)
kongruent-inkongruent	81.0 (10.1)	891 (226)
inkongruent-kongruent	75.0 (10.9)	1000 (235)
inkongruent-inkongruent	77.9 (9.5)	987 (212)
gekreuzt		
kongruent-kongruent	80.3 (7.7)	918 (201)
kongruent-inkongruent	78.0 (11.5)	934 (212)
inkongruent-kongruent	75.3 (14.2)	1019 (233)
inkongruent-inkongruent	73.0 (10.7)	1021 (234)

3.4. Diskussion

In Studie 2 wurde das Paradigma für den visuell-taktilen Abgleich von Mustern erweitert, indem auf beiden Seiten gleichzeitig stimuliert wurde. Untersucht werden sollten Interaktionen zwischen multisensorischer Integration und Konflikten des taktilen Referenzrahmens. Beeinflusst werden sollte der Abgleich durch die Faktoren Kongruenz, unbeachtete Seite und Handposition. Eine höhere Genauigkeit und schnellere Reaktionszeiten wurden bei kongruenten Musterpaaren erzielt. Kongruenz oder Inkongruenz der Musterpaare auf der unbeachteten Seite hatten jedoch keinen Einfluss, ebenso wenig wie die Handposition oder die zu beachtende Seite (links oder rechts).

Die Analyse der Reaktionszeiten und Genauigkeiten für den Abgleich von Kongruenz auf der linken und auf der rechten Körperseite ergab keine signifikanten Unterschiede. Es gibt jedoch Studien die zeigen, dass die Ausrichtung von räumlicher Aufmerksamkeit und Verarbeitungsressourcen tendenziell eher auf die rechte Raumseite erfolgt. Dadurch konnten bessere Leistungen bei Beachtung der rechten Raumseite beobachtet werden (Railo, Tallus, & Hämäläinen, 2011; Spence, Shore, & Klein, 2001). In einer Übersichtsarbeit vermuten Chen und Spence (2017), dass eine Lateralisierung von Aufmerksamkeit bei multisensorischen Aufgaben eher dann auftritt, wenn eine aufwendigere Verarbeitung der Stimuli nötig ist. Für diese Aufgaben wäre dann *top-down*-Aufmerksamkeit wichtig, um die entsprechenden Verarbeitungsressourcen auf die Stimuli zu richten. Als Aufgabe mit geringerem Bedarf an Verarbeitungsressourcen wird in dieser Übersichtsarbeit eine Studie von Kamke et al. (2012) besprochen. Hier wurde die *visuelle Blitz-Illusion* (siehe Kapitel 1.1) auf der linken und auf der rechten Seite untersucht (zudem erfolgte eine Manipulation mittels transkranieller Magnet-Stimulation, die hier nicht näher besprochen werden soll). Die Stimuli für die Illusion konnten auf der linken oder auf der rechten Seite auftreten. Es zeigten sich keine Unterschiede in der Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Illusion abhängig von der Seite. Chen und Spence vermuteten daher, dass aufgrund des frühen Zeitpunkts in der Verarbeitung, an dem die Illusion auftritt, und der einfacheren Aufgabe keine Lateralisierungseffekte zu finden waren. Bei einer Aufgabe die mehr Verarbeitungsressourcen benötigt, wie

in einer Studie von Chen und Spence (2011), zeigten sich hingegen bessere Leistungen auf der rechten Seite. In dieser Studie dienten bestimmte visuell präsentierte Buchstaben als *Targets* gemeinsam mit Pieptönen. Die visuellen *Targets* wurden zufällig auf der rechten oder auf der linken Seite gezeigt. Nun lässt sich vermuten, dass die in Studie 2 verwendeten Stimuli auch einer aufwendigeren Verarbeitung bedürfen, so dass eine Lateralisierung der Aufmerksamkeit zu erwarten gewesen wäre. Im Unterschied zu den besprochenen Studien wurde in Studie 2 jedoch immer auf beiden Seiten stimuliert. Zudem wurde vorgegeben welche Seite beachtet werden sollte. Somit könnte die Ausrichtung von *top-down*-Aufmerksamkeit und somit von Verarbeitungsressourcen hier schon vor der Stimulation erfolgt sein und war dadurch vermutlich weniger anfällig für Lateralisierungseffekte.

Die Analyse der Genauigkeiten und Reaktionszeiten mit ungekreuzten und gekreuzten Händen zeigte keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Handposition. Viele Studien, die schlechtere Leistungen mit gekreuzten Händen zeigen konnten, haben eine Antwort gefordert, die auf räumlichen Bezügen basierte (Heed & Azañón, 2014; Shore, Spry, & Spence, 2002; Yamamoto & Kitazawa, 2001). Zur Beantwortung der Aufgabe in Studie 2 musste jedoch keine Angabe zur Lage der Stimuli im Raum gemacht werden. Daher ist es möglich, dass es nicht zu einer Störung des internen und externen Referenzrahmens kam, weil diese nicht aufgabenrelevant waren. Es konnten aber auch bei Aufgaben, die keine räumlich bezogene Antwort erforderten, Nachteile bei den Leistungen mit gekreuzten Händen gefunden werden (Holmes, Sanabria, Calvert, & Spence, 2006). In dieser Studie mussten taktile Stimuli unterschieden werden, während visuelle Distraktoren präsentiert wurden. Diese Aufgabe unterscheidet sich also wesentlich von der Aufgabe in Studie 2, die einen expliziten Abgleich von visuellen und taktilen Stimuli erforderte. Andere Studien, die eine Beachtung mehrerer Modalitäten mit gekreuzten Händen untersucht haben, sind schwer vergleichbar mit dem aktuellen Design. Buchholz et al. (2012) haben unter anderem die Beachtung visuell-taktiler Stimuli mit gekreuzten Händen untersucht. In dieser Studie wurde aber eine räumliche Lokalisation der Stimuli gefordert, indem der Blick auf ein auftretendes *Target* gerichtet werden sollte. Eine andere Studie, die den Einfluss der Handposition untersucht hat, kommt zu den folgenden Ergebnissen. Es gibt Hinweise, dass mit

steigender Schwierigkeit der Aufgabe ein verminderter Einfluss durch gekreuzte Hände stattfinden kann. Wurde neben der TOJ-Aufgabe eine weitere anspruchsvolle Aufgabe ausgeführt, so waren die Effekte durch gekreuzte Hände auf die Leistung geringer (Badde, Heed, & Röder, 2014). In Studie 2 sollte ein Abgleich von visuell-taktilen Mustern erfolgen. Es lässt sich vermuten, dass diese Aufgabe anspruchsvoller war als zum Beispiel die Beurteilung der zeitlichen Reihenfolge von taktilen Reizen. Zudem wurde in Studie 2 für jeden Durchgang die zu beachtende Seite neu angewiesen, so dass schnelle Wechsel der Aufmerksamkeitsausrichtung nötig waren. Insgesamt könnte die anspruchsvollere Aufgabe in diesem Fall zu einem verringerten Einfluss durch gekreuzte Hände geführt haben. Anzumerken ist auch, dass deutliche Kongruenzeffekte für visuell-taktile Stimuli mit gekreuzten Händen bekannt sind. Spence, Pavani und Driver (2004) konnten zeigen, dass mit gekreuzten Händen die Detektion von taktilen Zielstimuli besser war, wenn visuelle Distraktoren auf der gleichen Seite im Raum (kongruent) präsentiert wurden. In diesem Fall war Kongruenz zwar als *bottom-up*-Faktor eingesetzt und eine räumlich bezogene Antwort war erforderlich, trotzdem zeigte diese Studie, dass kongruente Reize wirken können, wenn sie in räumlicher Nähe auftreten – auch wenn der interne Referenzrahmen nicht mit dem externen übereinstimmte. In dieser Studie wurde auf ein komplettes Remapping der taktilen Lokalisation bei gekreuzten Händen geschlossen, so dass nun die gleichen Kongruenzeffekte zu finden waren wie mit ungekreuzten Händen.

Nun soll besprochen werden, wie sich beachtete und unbeachtete Kongruenz auswirkten. Die Bedeutung von Kongruenz zwischen visuellen und taktilen Punktemustern für Reaktionszeiten und Genauigkeiten konnte bereits in vorhergehenden Studien gezeigt werden. Göschl et al. (2014) haben das Verhalten bei der Beurteilung von Kongruenz zwischen visuell-taktilen Musterpaaren untersucht. Hier zeigten sich bessere Genauigkeiten und schnellere Reaktionszeiten, wenn kongruente visuell-taktile Musterpaare auf Kongruenz untersucht wurden verglichen zu inkongruenten Musterpaaren. Auch wenn eine Untersuchung der Kongruenz zwischen den visuell-taktilen Musterpaaren nicht erforderlich war und nach *Targets* in beiden Modalitäten gesucht werden sollte, zeigten sich bessere Genauigkeiten und schnellere Reaktionszeiten für kongruente visuell-taktile

Musterpaare. Kongruenzeffekte, die über einfache räumliche oder zeitliche Kongruenz hinausgehen, konnten auch in anderen Modalitäten gezeigt werden. So wurde in einer Studie mit audio-visuellen Stimuli Kongruenz durch die Farbe von visuell präsentierten Kreisen und die Verbalisierung der Farbnamen erzeugt. Es konnten bessere Leistungen bei kongruenten im Vergleich zu inkongruenten und zu nur unimodal präsentierten Stimuli gezeigt werden (Laurienti, Kraft, Maldjian, Burdette, & Wallace, 2004). Im Unterschied zu diesen Studien wurde in der vorliegenden Studie jedoch bimodal auf beiden Seiten stimuliert und es mussten immer beide Modalitäten beachtet werden. Auch auf der unbeachteten Seite konnte somit Kongruenz auftreten. Hier war die Frage, ob Kongruenz auf der unbeachteten Seite als *bottom-up*-Faktor in einer Umgebung mit vielen Reizen in der Lage ist, die Aufmerksamkeit zu erregen und Einfluss auf die Verarbeitung der beachteten Reize zu nehmen. Bisher existieren nur wenige Studien mit bilateraler multisensorischer Stimulation. Der Einfluss von unbeachteter Kongruenz wurde meistens durch Studien untersucht, bei denen eine Modalität beachtet werden sollte und Stimuli in dieser Modalität kongruent oder inkongruent zu einer anderen, unbeachteten Modalität sein konnten. Es zeigten sich unterschiedliche Ergebnisse. Morís Fernández et al. (2015) haben in einer Studie zu audiovisueller Spracherkennung gleichzeitig zwei auditorische Sprachströme präsentiert. Einer dieser Sprachströme sollte beachtet werden, wobei gleichzeitig sprechende Lippen zu sehen waren. Die Worterkennung war besser, wenn der auditorische Sprachstrom beachtet und kongruent zu den Lippenbewegungen war. Wurde der Sprachstrom beachtet, der inkongruent zu den Lippenbewegungen war, während der unbeachtete Sprachstrom kongruent zu den Lippenbewegungen war, so zeigte sich kein Einfluss auf die Worterkennung. Eine andere Studie wiederum zeigte, dass Kongruenz zwischen einer unbeachteten Modalität und einer von zwei beachteten Modalitäten zu schlechteren Leistungen und Inkongruenz zu besseren Leistungen führen kann, wenn die beachteten Modalitäten inkongruent zueinander sind (Misselhorn, Daume, Engel, & Friese, 2016). Hier konnte eine ablenkende Wirkung von unbeachteter Kongruenz vermutet werden, die mit einer Verlagerung der Aufmerksamkeit oder Konflikten bei der Antwortauswahl zusammenhängen könnte. Die Ergebnisse dieser Studien legen nahe, dass unbeachtete Kongruenz abhängig von der Aufgabe und den verwendeten Stimuli Einfluss auf die Verarbeitung nehmen kann. Vermutlich war in Studie 2 der Abgleich

von visuell-taktilen Musterpaaren eher anspruchsvoll und beanspruchte einen großen Teil der Verarbeitungsressourcen. Dadurch hatten die unbeachteten und für die Aufgabe irrelevanten Stimuli keinen Einfluss auf die Leistung. Auch Alsius et al. (2005) haben multisensorische Integration unter hohen Aufmerksamkeitsansprüchen getestet. Es wurde untersucht, ob die audio-visuelle McGurk-Illusion auch stattfindet, wenn die Aufmerksamkeit durch eine andere Aufgabe stark beansprucht wird. Durch diese Aufmerksamkeitslenkung auf andere Aufgaben konnte eine Abschwächung der McGurk-Illusion und somit eine verminderte multisensorische Integration durch verminderte Aufmerksamkeit gezeigt werden. Im Gegensatz dazu konnten Zimmer und Macaluso (2007) keinen Einfluss von Aufmerksamkeit auf die Erfassung räumlicher Kongruenz von visuell-taktilen Stimuli zeigen. Die Messungen mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) zeigten eine vergleichbare Aktivität für kongruente Reize im kontralateralen okzipitalen Kortex, die unabhängig von der Aufmerksamkeitsmanipulation war. Diese Studien in unterschiedlichen Modalitäten und mit unterschiedlichen Manipulationen von Aufmerksamkeit sowie verschiedenen Messmethoden zeigen, dass es ein komplexes Zusammenspiel von Aufmerksamkeit und multisensorischer Integration gibt. Für die bilaterale Stimulation mit visuell-taktilen Reizen konnte in Studie 2 gezeigt werden, dass die Lenkung der Aufmerksamkeit auf eine anspruchsvolle Aufgabe auf einer Seite dazu führte, dass Kongruenz oder Inkongruenz der Stimuli auf der unbeachteten Seite keinen Einfluss auf die gemessenen Verhaltensdaten hatten. Es lässt sich vermuten, dass große Verarbeitungsressourcen nötig waren, um bei insgesamt vier auf einmal auftretenden Stimuli nur zwei explizit zu untersuchen. Multisensorische Integration kann wie in Kapitel 1.1 dargestellt in *bottom-up*-Weise nahezu automatisch stattfinden. Werden wie in Studie 2 jedoch große Teile der Verarbeitungsressourcen an anderer Stelle benötigt, so waren möglicherweise nicht mehr genug Verarbeitungsressourcen für einen in den Verhaltensdaten messbaren *bottom-up*-Effekt von Kongruenz übrig. Möglicherweise wurde die Verarbeitung der nicht zu beachteten Stimuli auch aktiv unterdrückt, um eine Ablenkung zu verhindern.

Als limitierend in Studie 2 anzumerken ist die geringe Probandenzahl. Von 40 Versuchspersonen, die das Training bestanden haben, konnten nur 18 eine überzufällige Leistung im Versuch zeigen. Somit war die gestellte Aufgabe sehr

schwierig. Welche Faktoren auf Probandenseite auf die Leistung Einfluss genommen haben, ist schwer festzustellen. Die Frage, warum einige Menschen visuell-taktile Muster besser abgleichen können als andere, ist also noch offen.

Um zu untersuchen, ob Kongruenz und Inkongruenz auf der unbeachteten Seite einen Effekt haben können, wurde die Aufgabe in vereinfachter Form durchgeführt mit Messungen mittels der Magnetoenzephalographie (MEG). Die gekreuzte Handposition wurde zunächst nicht angewendet und der Hinweis auf die zu beachtende Seite erfolgte blockweise. So konnte bei einem geringeren Anspruch der Aufgabe geprüft werden, ob unbeachtete Kongruenz einen Einfluss auf multisensorische Integration haben kann. Es liegen bereits vorläufige Verhaltensdaten vor, bei denen die Genauigkeiten analysiert wurden. Kongruenz auf der beachteten und unbeachteten Seite führte zu den höchsten Genauigkeiten (Mittelwert (M)=83.78 %, Standardabweichung (SD)=7.15 %), gefolgt von Kongruenz auf der beachteten und Inkongruenz auf der unbeachteten Seite (M=82.29 %, SD=7.19 %), Inkongruenz auf der beachteten und Kongruenz auf der unbeachteten Seite (M=76.67 %, SD=9.63 %) und Inkongruenz auf beiden Seiten (M=73.96 %, SD=9.3 %). In einer 2 x 2 x 2 ANOVA mit Messwiederholungen mit den Faktoren *Aufmerksamkeit* (links vs. rechts), *Kongruenz auf der beachteten Seite* (kongruent vs. inkongruent) und *Kongruenz auf der unbeachteten Seite* (kongruent vs. inkongruent) konnte ein signifikanter Effekt für *Kongruenz auf der beachteten Seite* ($F_{1, 19} = 13.7, p < 0.01$) und für *Kongruenz auf der unbeachteten Seite* ($F_{1, 19} = 5.33, p < 0.05$) gefunden werden. Bei einer Vereinfachung der bilateralen Aufgabe kann es also zu Effekten durch Kongruenz auf der unbeachteten Seite kommen. Es ist zu vermuten, dass nun weniger Verarbeitungsressourcen für die Aufgabe benötigt wurden, so dass *bottom-up*-Effekte durch nicht beachtete Kongruenz messbar wurden. *Bottom-up*-Effekte und *top-down*-Aufmerksamkeit scheinen also in einem Wechselspiel miteinander zu stehen, welches durch die Aufgabenschwierigkeit moduliert wird. Je schwieriger die Aufgabe, desto mehr *top-down*-Aufmerksamkeit wird nötig und desto geringer der Effekt durch *bottom-up*-Prozesse.

4. Zusammenfassung

4.1. Zusammenfassung in Deutsch

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie multisensorische Integration visuell-taktiler Stimuli durch Kongruenz und *bottom-up*-Targeteffekte und *top-down*-Einflüssen wie Aufmerksamkeit und der Aufgabenstellung moduliert werden kann. Es wurden zwei Studien durchgeführt, wobei in beiden Studien visuelle und taktile Punktemuster verwendet wurden, die gleichzeitig präsentiert wurden. In Studie 1 wurden EKP bei zwei verschiedenen Aufgaben gemessen. In der **Detektionsaufgabe** wurde ein Punktemuster als *Target* definiert. Zwischen den visuell-taktilen Stimuli konnte Kongruenz auftreten, diese war jedoch nicht aufgabenrelevant. Unterschiede zwischen Durchgängen mit und ohne *Targets* sowie mit und ohne Kongruenz wurden untersucht. Es wurde eine größere P3 bei visuellen *Targets* gefunden. Bei taktilen *Targets* zeigte sich kein Effekt in den EKP im Vergleich zu Durchgängen ohne *Targets*. Traten ein visuelles und ein taktiler *Target* gleichzeitig auf, so dass auch Kongruenz vorhanden war, zeigte sich eine größere P3 und bessere Leistungen in den Verhaltensdaten. Die Effekte in der P3 waren jedoch nicht signifikant größer als die durch ein visuelles *Target*. War kein *Target* vorhanden, so zeigten sich keine Kongruenzeffekte. Insgesamt weisen diese Ergebnisse auf eine *bottom-up*-Lenkung der Aufmerksamkeit durch visuelle *Targets* hin. Die Verarbeitungsressourcen könnten dadurch zunächst durch die *Targets* gebunden worden sein, so dass nicht-aufgabenrelevante Kongruenz in der **Detektionsaufgabe** erst an einem späteren Zeitabschnitt der Verarbeitung auftrat. In der **Kongruenzevaluationsaufgabe** von Studie 1 wurden EKP bei aufgabenrelevanter Kongruenz gemessen. Die visuell-taktilen Stimuli wurden auf ihre Kongruenz hin beurteilt. Es zeigten sich im späten Teil der P3 größere Amplituden für kongruente Kombinationen. Der späte Zeitpunkt dieser Effekte könnte mit den vermehrt benötigten Verarbeitungsressourcen zur Evaluation der Kongruenz zusammenhängen. Der Vergleich der **Detektionsaufgabe** und der **Kongruenzevaluationsaufgabe** wies darauf hin, dass die in der **Detektionsaufgabe** erforderliche Erinnerung des *Targets* über *top-down*-Einflüsse

des Arbeitsgedächtnis die Verarbeitung der Muster vorangetrieben haben könnte. Zudem zeigte sich hier erneut der *bottom-up*-Effekt durch *Targets*, der die Ausrichtung der Aufmerksamkeit in der **Detektionsaufgabe** lenkte. Studie 1 zeigte die Interaktion von Kongruenz und *bottom-up*-Targeteffekten sowie von *top-down*-Einflüssen der Aufgabenstellung und des Arbeitsgedächtnis in der Modulation von EKP.

In Studie 2 wurde ein neues Paradigma mit den bekannten visuell-taktilen Punktemustern entwickelt, bei dem gleichzeitig visuell und taktil auf der linken und auf der rechten Körperseite stimuliert wurde. Beide Modalitäten auf einer Seite sollten beachtet und auf Kongruenz hin untersucht werden. Diese Aufgabe wurde mit ungekreuzter und gekreuzter Handposition durchgeführt. Taktile Stimuli können basierend auf einem internen Referenzrahmen lokalisiert werden, der auf dem anatomischen Aufbau des somatosensorischen Kortex beruht. Zudem können taktile Stimuli in einen externen Referenzrahmen eingeordnet werden, der auf der räumlichen Position des Stimulus beruht. Mit überkreuzten Händen können Konflikte zwischen dem inneren und äußeren Referenzrahmen entstehen. Es wurden höhere Genauigkeiten und schnellere Reaktionszeiten bei kongruenten Stimuli auf der beachteten Seite gefunden. Keine Effekte fanden sich durch die Handposition oder durch Kongruenz auf der unbeachteten Seite. Dies könnte zurückzuführen sein auf die hohe Schwierigkeit der gestellten Aufgabe. Hierdurch musste in *top-down*-Weise ein großer Teil der Verarbeitungsressourcen auf die zu beachtende Seite ausgerichtet werden, so dass unbeachtete Kongruenz nicht in *bottom-up*-Weise zu Effekten führen konnte. Zudem war in dieser Aufgabe keine räumliche Lokalisation der Stimuli nötig, so dass ein Konflikt zwischen dem inneren und äußeren taktilen Referenzrahmen nicht deutlich wurde. Dieser Konflikt kann zudem bei anspruchsvolleren Aufgaben wie der hier verwendeten einen verminderten Einfluss haben. Studie 2 machte deutlich, wie die Ausrichtung von *top-down*-Aufmerksamkeit auf relevante Stimuli *bottom-up*-Effekte durch Kongruenz mindern kann.

4.2. Zusammenfassung in Englisch

In the present work we investigated how multisensory integration of visual-tactile stimuli can be modulated by congruence and bottom-up target effects and top-down influences such as attention and task-position. Two studies were performed presenting both visual and tactile point patterns simultaneously. In study 1, ERP were measured in two different tasks. In the detection task, one point pattern was defined as the target. Congruency could occur between the visual-tactile stimuli, but this was not task-relevant. Differences between runs with and without targets as well as with and without congruence were investigated. A larger P3 was found for visual targets. For tactile targets, there was no effect on the ERP compared to no-target runs. When a visual and a tactile target appeared at the same time, so that there was also congruency, a larger P3 and better performance in the behavioral data was found. However, the effects in P3 were not significantly greater than those by a visual target. If no target was present, there were no congruency effects. Overall, these results point to a bottom-up steering of attention by visual targets. The processing resources could thereby have been bound first by the targets, so that non-task-relevant congruency in the detection task occurred just at a later period of the processing.

In the congruence evaluation task of study 1, ERP were measured in task-relevant congruency. The visual-tactile stimuli were evaluated for congruency. There were larger amplitudes for congruent combinations in the late part of P3. The late timing of these effects could be related to the increased processing resources needed to evaluate congruency. The comparison of the detection task and the congruency evaluation task indicated that the memory required for the target modulated the processing of the patterns through influence of the working memory. In addition, the bottom-up effect was again revealed by targets, which guided the focus of attention in the detection task. Study 1 demonstrated the interaction of congruency and bottom-up targeting effects as well as top-down effects of task-position and working memory in the modulation of ERP.

In Study 2, a new paradigm was developed with the familiar visual-tactile point patterns, in which visual and tactile stimuli were presented simultaneously on the left

and right side of the body. Both modalities on one side should be attended and examined for congruence. This task was performed with an uncrossed and crossed hand position. Tactile stimuli can be localized based on an internal reference frame based on the anatomical structure of the somatosensory cortex. In addition, tactile stimuli can be placed in an external reference frame based on the spatial location of the stimulus. Crossed hands can create conflicts between the internal and external reference frame. Higher accuracies and faster response times were found with congruent stimuli on the attended side. No effects were found due to the hand position or due to congruency on the unattended side. This could be attributed to the high difficulty of the task. As a result, a large part of the processing resources had to be aligned in a top-down manner on side that had to be attended, so that unattended congruency could not lead to effects in a bottom-up manner. In addition, no spatial localization of the stimuli was necessary in this task, so that a conflict between the external and internal tactile reference frame could not become noticeable. This conflict could also have diminished influence on more demanding tasks such as those used here. Study 2 highlighted how aligning top-down attention with relevant stimuli can reduce bottom-up effects through congruency.

5. Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Varianzanalyse (Analysis of Variance)
ANG	Gyrus angularis
COSTRAP	Correction of Saccade-related Transient Potentials
EEG	Elektroenzephalogramm
EKP	Ereignis-korreliertes-Potential
EOG	Elektrookulogramm
eLORETA	exact Low-resolution Brain Electromagnetic Tomography
FDR	False Discovery Rate
FEF	frontales Augenfeld
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomographie
ICA	Unabhängige Komponentenanalyse (Independent Component Analysis)
IPS	Sulcus intraparietalis
IST	Sulcus intraparietalis
M1	primär motorischer Kortex
MEG	Magnetoenzephalographie
MFG	Gyrus frontalis medius
MNI	Montreal Neurological Institute
OFC	orbitofrontaler Kortex
PPC	posteriorer parietaler Kortex
PSP	Postsynaptische Potentiale
ROI	Region von Interesse (Region of Interest)
SMG	Gyrus supramarginalis
SPL	Lobus parietalis superior
STS	Sulcus temporalis superior
TOJ	Beurteilung der zeitlichen Reihenfolge (Temporal Order Judgement)
TPJ	temporo-parietaler Übergang
V1	primär visueller Kortex

V2	sekundär visueller Kortex
V3	tertiär visueller Kortex
VFC	präfrontaler Kortex

6. Literaturverzeichnis

Alais, D., & Burr, D. (2004). The Ventriloquist Effect Results from Near-Optimal Bimodal Integration. *Current Biology*, 14 (3), S. 257–262.

Alsius, A., Navarra, J., Campbell, R., & Soto-Faraco, S. (2005). Audiovisual Integration of Speech Alters under High Attention Demands. *Current Biology*, 15, S. 839–843.

Arcaro, M., & Kastner, S. (2015). Topographic organization of areas V3 and V4 and its relation to supra-areal organization of the primate visual system. *Visual Neuroscience*, 32 (E014), S. 1-34.

Avillac, M., Ben Hamed, S., & Duhamel, J. (2007). Multisensory Integration in the Ventral Intraparietal Area of the Macaque Monkey. *The Journal of Neuroscience*, 27 (8), S. 1922–1932.

Azizian, A., Freitas, A., Watson, T., & Squires, N. (2006). Electrophysiological correlates of categorization: P300 amplitude as index of target similarity. *Biological Psychology*, 71, S. 278–288.

Badde, S., & Heed, T. (2016). Towards explaining spatial touch perception: Weighted integration of multiple location codes. *Cognitive Neuropsychology*, 33 (1-2), S. 26–47.

Badde, S., Heed, R., & Röder, B. (2014). Processing load impairs coordinate integration for the localization of touch. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76, S. 1136–1150.

Barraclough, N., Xiao, D., Baker, C., Oram, M., & Perrett, D. (2005). Integration of Visual and Auditory Information by Superior Temporal Sulcus Neurons Responsive to the Sight of Actions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17 (3), S. 377–391.

Barutchu, A., Freestone, D., Innes-Brown, H., Crewther, D., & Crewther, S. (2013). Evidence for Enhanced Multisensory Facilitation with Stimulus Relevance: An Electrophysiological Investigation. *PLoS ONE* , 8 (1), S. 1-12.

Benevento, L., Fallon, J., Davis, B., & Rezak, M. (1977). Auditory-visual interaction in single cells in the cortex of the superior temporal sulcus and the orbital frontal cortex of the macaque monkey. *Experimental Neurology* , 57 (3), S. 849-72.

Berger, P. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* , 87 (1), S. 527–570.

Bertelson, P., Vroomen, J., de Gelder, B., & Driver, J. (2000). The ventriloquist effect does not depend on the direction of deliberate visual attention. *Perception & Psychophysics* , 62 (2), S. 321-332.

Broadbent, D. (1958). *Perception and communication*. London: Pergamon Press.

Bruin, K., & Wijers, A. (2002). Inhibition, response mode, and stimulus probability: a comparative event-related potential study. *Clinical Neurophysiology* , 113, S. 1172–1182.

Buchholz, V., Goonetilleke, S., Medendorp, W., & Corneil, B. (2012). Greater benefits of multisensory integration during complex sensorimotor transformations. *Journal of Neurophysiology* , 107 (11), S. 3135–3143.

Buzsáki, G., Anastassiou, C., & Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents — EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature Reviews Neuroscience* , 13, S. 407-420.

Calvert, G. (2001). Crossmodal Processing in the Human Brain: Insights from Functional Neuroimaging Studies. *Cerebral Cortex* , 11, S. 1110–1123.

Chen, Y., & Spence, C. (2017). Hemispheric asymmetry: Looking for a novel signature of the modulation of spatial attention in multisensory processing. *Psychonomic Bulletin & Review* , 24 (3), S. 690–707.

Ciaramelli, E., Grady, C., & Moscovitch, M. (2008). Top-down and bottom-up attention to memory: A hypothesis (AtoM) on the role of the posterior parietal cortex in memory retrieval. *Neuropsychologia* , 46, S. 1828–1851.

Clark, V., Fan, S., & Hillyard, S. (1996). Identification of early visual evoked potential generators by retinotopic and topographic analyses. *Human Brain Mapping* , 2, S. 170-187.

Comerchero, M., & Polich, J. (1999). P3a and P3b from typical auditory and visual stimuli. *Clinical Neurophysiology* , 110, S. 24–30.

Crosse, M., Di Liberto, G., & Lalor, E. (2016). Eye can hear clearly now: Inverse Effectiveness in natural audiovisual speech processing relies on long-term crossmodal temporal Integration. *J Neurosci* , 36(38).

Czigler, I., Balázs, L., & Winkler, I. (2002). Memory-based detection of task-irrelevant visual changes. *Psychophysiology* , 39 (6), S. 869–873 .

Debener, S., Kranczioch, C., Herrmann, C., & Engel, A. (2002). Auditory novelty oddball allows reliable distinction of top–down and bottom–up processes of attention. *International Journal of Psychophysiology* , 46, S. 77–84.

Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods* , 134 (1), S. 9–21.

Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural Mechanisms of Selective Visual Attention. *Annual Review of Neuroscience* , 18 (1), S. 193-222.

Dionne, J., Legon, W., & Staines, W. (2013). Crossmodal influences on early somatosensory processing: interaction of vision, touch, and task-relevance. *Experimental Brain Research* , 226, S. 503–512.

Disbrow, E., Roberts, T., & Krubitzer, L. (2000). Somatotopic organization of cortical fields in the lateral sulcus of homo sapiens: evidence for SII and PV. *Journal of Comparative Neurology* , 2 (1), S. 1-21.

Doesburg, S., Emberson, L., Rahi, A., Cameron, D., & Ward, L. (2008). Asynchrony from synchrony: long-range gamma-band neural synchrony accompanies perception of audiovisual speech asynchrony. *Experimental Brain Research* , 185 (1), S. 11–20.

Donohue, S., Todisco, A., & Woldorff, M. (2013). The rapid distraction of attentional resources toward the source of incongruent stimulus input during multisensory conflict. *J Cogn Neurosci.* , 25 (4), S. 623–635.

Driver, J., & Spence, C. (1998). Cross-modal links in spatial attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* , 353 (1373), S. 1319-1331.

Driver, J., & Spence, C. (2000). Multisensory perception: Beyond modularity and convergence. *Current Biology* , 10 (20), S. 731–735.

Eimer, M., & Driver, J. (2000). An event-related brain potential study of cross-modal links in spatial attention between vision and touch. *Psychophysiology* , 37, S. 697–705.

Eimer, M., & van Velzen, J. (2005). Spatial tuning of tactile attention modulates visual processing within hemifields: an ERP investigation of crossmodal attention. *Experimental Brain Research* , 166, S. 402–410.

Ernst, M., & Bühlhoff, H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences* , 8 (4), S. 162-169.

Ernst, M., & Banks, M. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415 (6870), S. 429–433.

Fairhall, S., & Macaluso, E. (2009). Spatial attention can modulate audiovisual integration at multiple cortical and subcortical sites. *European Journal of Neuroscience*, 29, S. 1247–1257.

Felleman, D., & Van Essen, D. (1991). Distributed Hierarchical Processing in the Primate Cerebral Cortex. *Cerebral Cortex*, 1, S. 1-47.

Folstein, J., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology*, 45 (1), S. 152–170.

Forster, B., & Pavone, E. (2008). Electrophysiological correlates of crossmodal visual distractor congruency effects: Evidence for response conflict. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 8 (1), S. 65-73.

Foxe, J., & Schroeder, C. (2005). The case for feedforward multisensory convergence during early cortical processing. *Neuroreport*, 16 (5), S. 419-423.

Frassinetti, F., Bolognini, N., & Làdavas, E. (2002). Enhancement of visual perception by crossmodal visuo-auditory interaction. *Experimental Brain Research*, 147 (3), S. 332–343.

Friedman, D., Cycowicz, Y., & Gaeta, H. (2001). The novelty P3: an event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 25, S. 355-373.

Friese, U., Köster, M., Hassler, U., Martens, U., Trujillo-Barreto, N., & Gruber, T. (2013). Successful memory encoding is associated with increased cross-frequency coupling between frontal theta and posterior gamma oscillations in human scalp-recorded EEG. *NeuroImage*, 66, S. 642–647.

Göschl, F., Engel, A., & Fries, U. (2014). Attention Modulates Visual-Tactile Interaction in Spatial Pattern Matching. *PLoS ONE* , 9 (9), S. 1-9.

Göschl, F., Fries, U., Daume, J., König, P., & Engel, A. (2015). Oscillatory signatures of crossmodal congruence effects: An EEG investigation employing a visuotactile pattern matching paradigm. *NeuroImage* , 116, S. 177–186.

Ghazanfar, A., & Schroeder, C. (2006). Is neocortex essentially multisensory? *Trends in Cognitive Sciences* , 10 (6), S. 278-285.

Gherri, E., & Forster, B. (2015). Independent effects of eye gaze and spatial attention on the processing of tactile events: Evidence from event-related potentials. *Biological Psychology* , 109, S. 239–247.

Gillmeister, H., & Eimer, M. (2007). Tactile enhancement of auditory detection and perceived loudness. *Brain Research* , 1160, S. 58-68.

Graziano, M., Reiss, L., & Gross, C. (1999). Aneuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature* , 397, S. 428-430.

Graziano, M., Yap, G., & Gross, C. (1994). Coding of Visual Space by Premotor Neurons. *Science* , 266, S. 1054-1057.

Guthrie, D., & Buchwald, J. (1991). Significance testing of difference potentials. *Psychophysiology* . , 28 (2), S. 240-244.

Hassler, U., Fries, U., Martens, U., Trujillo-Barreto, N., & Gruber, T. (2013). Repetition priming effects dissociate between miniature eye movements and induced gamma-band responses in the human electroencephalogram. *European Journal of Neuroscience* , 38 (3), S. 2425–2433.

Hassler, U., Trujillo Barreto, N., & Gruber, T. (2011). Induced gamma band responses in human EEG after the control of miniature saccadic artifacts. *NeuroImage* , 57 (4), S. 1411–1421.

Heed, T., & Azañón, E. (2014). Using time to investigate space: a review of tactile temporal order judgments as a window onto spatial processing in touch. *Frontiers in Psychology* , 5 (76), S. 1-16.

Holmes, N. (2009). The Principle of Inverse Effectiveness in Multisensory Integration: Some Statistical Considerations. *Brain Topography* , 21, S. 168–176.

Holmes, N., Sanabria, D., Calvert, G., & Spence, C. (2006). Multisensory interactions follow the hands across the midline: Evidence from a non-spatial visual-tactile congruency task. *Brain Research* , 1077 (1), S. 108-115.

Hummel, F., & Gerloff, C. (2005). Larger Interregional Synchrony is Associated with Greater Behavioral Success in a Complex Sensory Integration Task in Humans. *Cerebral Cortex* , 15, S. 670–678.

Hyvärinen, J., & Shelepin, Y. (1979). Distribution of visual and somatic functions in the parietal associative area 7 of the monkey. *Brain Research* , 169, S. 561-564.

Jones, E., & Powell, T. (1970). An anatomical study of converging sensory pathways within the cerebral cortex of the monkey. *Brain* , 93, S. 793-820.

Jung, T., Makeig, S., McKeown, M., Bell, A., Lee, T., & Sejnowski, T. (2001). Imaging Brain Dynamics Using Independent Component Analysis. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers* , 89 (7), S. 1107–1122.

Kamke, M., Vieth, H., Cottrell, D., & Mattingley, J. (2012). Parietal disruption alters audiovisual binding in the sound-induced flash illusion. *NeuroImage* , 62, S. 1334–1341.

Kanayama, N., Sato, A., & Ohira, H. (2007). Crossmodal effect with rubber hand illusion and gamma-band activity. *Psychophysiol* , 44, S. 392–402.

Kayser, C., & Logothetis, N. (2009). Directed interactions between auditory and superior temporal cortices and their role in sensory integration. *Frontiers in Integrative Neuroscience* , 3 (7), S. 1-11.

Kayser, C., & Logothetis, N. (2007). Do early sensory cortices integrate cross-modal information? *Brain Structure and Function* , 212, S. 121–132.

Kayser, C., Petkov, C., & Logothetis, N. (2008). Visual Modulation of Neurons in Auditory Cortex. *Cerebral Cortex* , 18, S. 1560-1574.

Kayser, C., Petkov, C., Augath, M., & Logothetis, N. (2005). Integration of Touch and Sound in Auditory Cortex. *Neuron* , 48, S. 373–384.

Keil, J., & Senkowski, D. (2018). Neural oscillations orchestrate multisensory processing. *The Neuroscientist* , 00 (0), S. 1-18.

Kessler, B., & Treiman, R. (2002). Phonetic Biases in Voice Key Response Time Measurements. *Journal of Memory and Language* , 47, S. 145–171.

Kim, K., Kim, J., Yoon, J., & Jung, K. (2008). Influence of task difficulty on the features of event-related potential during visual oddball task. *Neuroscience Letters* , 445, S. 179–183.

King, A., & Walker, K. (2012). Integrating Information from Different Senses in the Auditory Cortex. *Biological Cybernetics* , 106 (0), S. 617–625.

King, A., & Palmer, A. (1985). Integration of visual and auditory information in bimodal neurones in the guinea-pig superior colliculus. *Experimental Brain Research* , 60 (3), S. 492-500.

Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology* , 38, S. 557–577.

Kreber, M., Harwood, J., Spitzer, B., Keil, J., & Senkowski, D. (2015). Visuotactile motion congruence enhances gamma-band activity in visual and somatosensory cortices. *NeuroImage* , 117, S. 160-169.

Ku, Y., Zhao, D., Hao, N., Hu, Y., Bodner, M., & Zhou, Y. (2015). Sequential Roles of Primary Somatosensory Cortex and Posterior Parietal Cortex in Tactile-visual Cross-modal Working Memory: A Single-pulse Transcranial Magnetic Stimulation (spTMS) Study. *Brain Stimulation* , 8, S. 88-91.

Lancaster, J., Woldorff, M., Parsons, L., Liotti, M., Freitas, C., Rainey, L., et al. (2000). Automated Talairach atlas labels for functional brain mapping. *Human Brain Mapping* , 10, S. 120–131.

Laurienti, P., Kraft, R., Maldjian, J., Burdette, J., & Wallace, M. (2004). Semantic congruence is a critical factor in multisensory behavioral performance. *Experimental Brain Research* , 158, S. 405–414.

Laurienti, P., Perrault, T., Stanford, T., Wallace, M., & Stein, B. (2005). On the use of superadditivity as a metric for characterizing multisensory integration in functional neuroimaging studies. *Experimental Brain Research* , 166, S. 289–297.

Lehmann, D., & Skrandies, W. (1980). Reference-free identification of components of checkerboard-evoked multichannel potential fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* , 48 (6), S. 609-621.

Ley, P., Steinberg, U., Hanganu-Opatz, I., & Röder, B. (2015). Event-related potential evidence for a dynamic (re-)weighting of somatotopic and external coordinates of touch during visual–tactile interactions. *European Journal of Neuroscience* , 41, S. 1466–1474.

Lovelace, C., Stein, B., & Wallace, M. (2003). An irrelevant light enhances auditory detection in humans: a psychophysical analysis of multisensory integration in stimulus detection. *Cognitive Brain Research* , 17 (2), S. 447–453.

Luck, S. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Luck, S., & Hillyard, S. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology* , 31 (3), S. 291-308.

Macaluso, E., & Driver, J. (2005). Multisensory spatial interactions: a window onto functional integration in the human brain. *Trends in Neurosciences* , 28 (5), S. 264-271.

Macaluso, E., Frith, C., & Driver, J. (2002). Crossmodal Spatial Influences of Touch on Extrastriate Visual Areas Take Current Gaze Direction into Account. *Neuron* , 34, S. 647–658.

Macaluso, E., Frith, C., & Driver, J. (2000). Modulation of Human Visual Cortex by Crossmodal Spatial Attention. *Science* , 289, S. 1206–1208.

Macaluso, E., Noppeney, U., Talsma, D., Vercillo, T., Hartcher-O'Brien, J., & Adam, R. (2016). The Curious Incident of Attention in Multisensory Integration: Bottom-up vs. Top-down. *Multisensory Research* , 29, S. 557–583.

Machado, S., Arias-Carrión, O., Sampaio, I., Bittencourt, J., Velasques, B., Teixeira, S., et al. (2014). Source Imaging of P300 Visual Evoked Potentials and Cognitive Functions in Healthy Subjects. *Clinical EEG and Neuroscience* , 45 (4), S. 262– 268.

Mahoney, J., Molholm, S., Butler, J., Sehatpour, P., Gomez-Ramirez, M., Ritter, W., et al. (2015). Keeping in touch with the visual system: spatial alignment and multisensory integration of visual-somatosensory inputs. *Frontiers in Psychology* , 6 (1068??), S. 1-20.

Mangun, G. (1995). Neural mechanisms of visual selective attention. *Psychophysiology* , 32 (1), S. 4-18.

Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods* , 164 (1), S. 177–190.

Marks, L. (1974). On Associations of Light and Sound: The Mediation of Brightness, Pitch, and Loudness. *The American Journal of Psychology* , 87 (1-2), S. 173-188.

Martinez-Conde, S., Macknik, S., Troncoso, X., & Hubel, D. (2009). Microsaccades: a neurophysiological analysis. *Trends Neurosci* , 32, 463–475.

Matusz, P., & Eimer, M. (2011). Multisensory enhancement of attentional capture in visual search. *Psychonomic Bulletin & Review* , 18, S. 904–909.

McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature* , 264, S. 746-748.

Meredith, M. (2002). On the neuronal basis for multisensory convergence: a brief overview. *Cognitive Brain Research* , 14, S. 31–40.

Meredith, M., & Stein, B. (1983). Interactions among converging sensory inputs in the superior colliculus. *Science* , 221, S. 389-391.

Meredith, M., & Stein, B. (1986). Spatial factors determine the activity of multisensory neurons in cat superior colliculus. *Brain Research* , 365, S. 350–354.

Meredith, M., Nemitz, J., & Stein, B. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *Journal of Neuroscience* , 7 (10), S. 3215-3229.

Meyer, G., Harrison, N., & Wuerger, S. (2013). The time course of auditory–visual processing of speech and body actions: Evidence for the simultaneous activation of an extended neural network for semantic processing. *Neuropsychologia* , 51 (1), S. 1716–1725.

Misselhorn, J., Daume, J., Engel, A., & Fries, U. (2016). A matter of attention: Crossmodal congruence enhances and impairs performance in a novel trimodal matching paradigm. *Neuropsychologia* , 88, S. 113–122.

Molholm, S., Ritter, W., Javitt, D., & Foxe, J. (2004). Multisensory Visual–Auditory Object Recognition in Humans: a High-density Electrical Mapping Study. *Cerebral Cortex* , 14 (4), S. 452–465.

Morís Fernández, L., Visser, M., Ventura-Campos, N., Ávila, C., & Soto-Faraco, S. (2015). Top-down attention regulates the neural expression of audiovisual integration. *NeuroImage* , 119, S. 272–285.

Mozolic, J., Hugenschmidt, C., Peiffer, A., & Laurienti, P. (2008). Modality-specific selective attention attenuates multisensory integration. *Experimental Brain Research* , 184, S. 39–52.

Murata, K., Cramer, H., & Bach-y-Rita, P. (1965). Neuronal convergence of noxious, acoustic, and visual stimuli in the visual cortex of the cat. *J Neurophysiol.* , 28, S. 1223-1239.

Murray, M., Thelen, A., Thut, G., Romei, V., Martuzzi, R., & Matusz, P. (2016). The multisensory function of the human primary visual cortex. *Neuropsychologia* , 83, S. 161–169.

Nolte, G., & Dassios, G. (2005). Analytic expansion of the EEG lead field for realistic volume conductors. *Physics in Medicine & Biology* , 50 (16), S. 3807–3823.

Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J.-M. (2011). FieldTrip: Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data. *Computational Intelligence and Neuroscience* .

Pasalar, S., Ro, T., & Beauchamp, M. (2010). TMS of posterior parietal cortex disrupts visual tactile multisensory integration. *European Journal of Neuroscience* , 31 (10), S. 1783–1790.

Pascual-Marqui, R. (2007). Discrete, 3D distributed linear imaging methods of electric neuronal activity. Part 1: exact, zero error localization. *arXiv:0710.3341 [math-ph]* .

Pashler, H. (1999). *The Psychology of Attention*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Penfield, W., & Boldrey, E. (1937). Somatic Motor and Sensory Representation in the Cerebral Cortex of Man as Studied by Electrical Stimulation. *Brain* , 60 (4), S. 389-443.

Pitts, M., Padwal, J., Fennelly, D., Martínez, A., & Hillyard, S. (2014). Gamma band activity and the P3 reflect post-perceptual processes, not visual awareness. *NeuroImage* , 101, S. 337–350.

Popovich, C., & Staines, W. (2014). The attentional-relevance and temporal dynamics of visuotactile crossmodal interactions differentially influence early stages of somatosensory processing. *Brain and Behavior* , 4 (2), S. 247–260.

Posner, M., & Driver, J. (1992). The neurobiology of selective attention. *Current Opinion in Neurobiology* , 2 (2), S. 165-169.

Pouget, A., Ducom, J., Torri, J., & Bavalier, D. (2002). Multisensory spatial representations in eye-centered coordinates for reaching. *Cognition* , 2 (1), S. B1-B11.

Pouget, A., Ducom, J., Torri, J., & Bavelier, D. (2002). Multisensory spatial representations in eye-centered coordinates for reaching. *Cognition* , 83 (1), S. B1–B11.

Proctor, B., & Meyer, G. (2011). Electrophysiological correlates of facial configuration and audio–visual congruency: evidence that face processing is a visual rather than a multisensory task. *Experimental Brain Research* , 213 (2-3), S. 203–211.

Rach, S., Diederich, A., & Colonius, H. (2011). On quantifying multisensory interaction effects in reaction time and detection rate. *Psychological Research* , 75, S. 77–94.

Railo, H., Tallus, J., & Hämäläinen, H. (2011). Right visual field advantage for perceived contrast: Correlation with an auditory bias and handedness. *Brain and Cognition* , 77, S. 391–400.

Rushworth, M., Behrens, T., & Johansen-Berg, H. (2006). Connection Patterns Distinguish 3 Regions of Human Parietal Cortex. *Cerebral Cortex* , 16 (10), S. 1418–1430.

Schlack, A., Sterbing-D'Angelo, S., Hartung, K., Hoffmann, K., & Bremmer, F. (2005). Multisensory Space Representations in the Macaque Ventral Intraparietal Area. *The Journal of Neuroscience* , 25 (18), S. 4616–4625.

Schneider, T., Debener, S., Oostenveld, R., & Engel, A. (2008). Enhanced EEG gamma-band activity reflects multisensory semantic matching in visual-to-auditory object priming. *NeuroImage* , 42, S. 1244–1254.

Schneider, T., Lorenz, S., Senkowski, D., & Engel, A. (2011). Gamma-Band Activity as a Signature for Cross-Modal Priming of Auditory Object Recognition by Active Haptic Exploration. *The Journal of Neuroscience* , 31 (7), S. 2502–2510.

Schroeder, C., & Foxe, J. (2005). Multisensory contributions to low-level, 'unisensory' processing. *Current Opinion in Neurobiology* , 15, S. 454–458.

Seghier, M. (2013). The Angular Gyrus: Multiple Functions and Multiple Subdivisions. *The Neuroscientist* , 19 (1), S. 43– 61.

Selimbeyoglu, A., Keskin-Ergen, Y., & Demiralp, T. (2012). What if you are not sure? Electroencephalographic correlates of subjective confidence level about a decision. *Clinical Neurophysiology* , 123, S. 1158–1167.

Senkowski, D., Schneider, T., Foxe, J., & Engel, A. (2008). Crossmodal binding through neural coherence: implications for multisensory processing. *Trends in Neurosciences* , 31 (8), S. 401-409.

Senkowski, D., Schneider, T., Tandler, F., & Engel, A. (2009). Gamma-band activity reflects multisensory matching in working memory. *Experimental Brain Research* , 198 (2-3), S. 363-372.

Senkowski, D., Talsma, D., Grigutsch, M., Herrmann, C., & Woldorff, M. (2007). Good times for multisensory integration: Effects of the precision of temporal synchrony as revealed by gamma-band oscillations. *Neuropsychologia* , 45, S. 561–571.

Senkowski, D., Talsma, D., Herrmann, C., & Woldorff, M. (2005). Multisensory processing and oscillatory gamma responses: effects of spatial selective attention. *Experimental Brain Research* , 166, S. 411–426.

Shams, L., Kamitani, Y., & Shimojo, S. (2000). Illusions. What you see is what you hear. *Nature* , 408, S. 788.

Shams, L., Kamitani, Y., Thompson, S., & Shimojo, S. (2001). Sound alters visual evoked potentials in humans. *Neuroreport* , 12 (17), S. 3849-3852.

Shore, D., Spry, E., & Spence, C. (2002). Confusing the mind by crossing the hands. *Cognitive Brain Research* , 14 (1), S. 153–163.

Singh, A., Okamoto, M., Dan, H., Jurcak, V., & Dan, I. (2005). Spatial registration of multichannel multi-subject fNIRS data to MNI space without MRI. *NeuroImage* , 27 (4), S. 842 – 851.

Spence, C. (2011). Crossmodal correspondences: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics* , 73, S. 971–995.

Spence, C. (2013). Just how important is spatial coincidence to multisensory integration? Evaluating the spatial rule. *Annals of the New York Academy of Sciences* , 1296, S. 31–49.

Spence, C., Pavani, F., & Driver, J. (2004). Spatial constraints on visual–tactile cross-modal distractor congruency effects. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* , 4 (2), S. 148-169.

Spence, C., Shore, D., & Klein, R. (2001). Multisensory prior entry. *Journal of Experimental Psychology: General* , 130 (4), S. 799-832.

Squire, L., & Zola-Morgan, S. (1991). The Medial Temporal Lobe Memory System. *Science* , 253 (5026), S. 1380-1386.

Stein, B. (2012). *The New Handbook of Multisensory Processing*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Stein, B., & Meredith, M. (1993). *Merging of the Senses*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Stein, B., Burr, D., Constantinidis, C., Laurienti, P., Meredith, M., Perrault Jr, T., et al. (2010). Semantic confusion regarding the development of multisensory integration: a practical solution. *European Journal of Neuroscience* , 31 (10), S. 1713–1720.

Strüber, D., & Polich, J. (2002). P300 and slow wave from oddball and single-stimulus visual tasks: inter-stimulus interval effects. *International Journal of Psychophysiology* , 45, S. 187–196.

Talsma, D., Doty, T., & Woldorff, M. (2007). Selective Attention and Audiovisual Integration: Is Attending to Both Modalities a Prerequisite for Early Integration? *Cerebral Cortex* , 17 (1), S. 679-690.

Talsma, D., Senkowski, D., Soto-Faraco, S., & Woldorff, M. (2010). The multifaceted interplay between attention and multisensory integration. *Trends in Cognitive Sciences* , 14 (9), S. 400–410.

Tang, X., Wu, J., & Shen, Y. (2016). The interactions of multisensory integration with endogenous and exogenous attention. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* , 61, S. 208–224 .

Taylor-Clarke, M., Kennett, S., & Haggard, P. (2002). Vision Modulates Somatosensory Cortical Processing. *Current Biology* , 12, S. 233–236.

Tseng, H., Bossong, M., Modinos, G., Chen, K., McGuire, P., & Allen, P. (2015). A systematic review of multisensory cognitive–affective integration in schizophrenia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* , 55, S. 444–452.

Urbantschitsch, V. (1888). Ueber den Einfluss einer Sinneserregung auf die übrigen Sinnensempfindungen. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology* , 42 (1), S. 154-182 .

Van der Burg, E., Olivers, C., Bronkhorst, A., & Theeuwes, J. (2008). Pip and pop: Non-spatial auditory signals improve spatial visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* , 34 (5), S. 1053-1065.

Vogel, E., & Luck, S. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology* , 37, S. 190–203.

Vroomen, J., & de Gelder, B. (2004). Perceptual effects of cross-modal stimulation: ventriloquism and the freezing phenomenon. In G. Calvert, C. Spence, & B. Stein, *The Handbook of Multisensory Processes* (S. 35–48). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Walker, P., Francis, B., & Walker, L. (2010). The Brightness-Weight Illusion Darker Objects Look Heavier but Feel Lighter. *Experimental Psychology* , 57 (6), S. 462–469.

Wang, W., Hu, L., Valentini, E., Xie, X., Cui, H., & Hu, Y. (2012). Dynamic characteristics of multisensory facilitation and inhibition. *Cognitive Neurodynamics* , 6, S. 409–419.

Woodmann, G. (2010). A brief introduction to the use of event-related potentials in studies of perception and attention. *Attention, Perception, & Psychophysics* , 72 (8), S. 2031-2046.

Xie, Y., Xu, Y., Bian, C., & Li, M. (2017). Semantic congruent audiovisual integration during the encoding stage of working memory: an ERP and sLORETA study. *Scientific reports* , 7 (1), S. 5112.

Yamaguchi, S., & Knight, R. (1991). Anterior and posterior association cortex contributions to the somatosensory P300. *Journal of Neuroscience* , 11 (7), S. 2039-2054.

Yamamoto, S., & Kitazawa, S. (2001). Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. *Nature Neuroscience* , 4 (7), S. 759-765.

Zeller, D., Litvak, V., Friston, K., & Classen, J. (2015). Sensory Processing and the Rubber Hand Illusion—An Evoked Potentials Study. *Journal of Cognitive Neuroscience* , 27 (3), S. 573-82.

Zimmer, U., & Macaluso, E. (2007). Processing of multisensory spatial congruency can be dissociated from working memory and visuo-spatial attention. *European Journal of Neuroscience* , 26, S. 1681–1691.

7. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Andreas K. Engel, der diese Arbeit in einem inspirierenden Umfeld ermöglicht hat. Mein herzlicher Dank gilt auch den Kollegen und Kolleginnen des Instituts für Neurophysiologie und Pathophysiologie, die mir stets mit Rat und Tat zu Seite standen. Insbesondere bedanke ich mich bei Dr. Florian Göschl.

Ohne meine Eltern, meine Schwester, meinen Bruder und besonders meinen Ehemann wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen, daher gilt ihnen mein innigster Dank

Lebenslauf wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen entfernt.

Lebenslauf wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen entfernt.

9. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: