

Aus dem Institut für Systemische Motorikforschung  
der Universität zu Lübeck  
Prof. Dr. med. Alexander Münchau

**Theory of Event Coding im Somatosensorischen System**  
Entwicklung eines somatosensorischen experimentellen Paradigmas  
zur Untersuchung von Stimulus-Reaktions-Kopplung

Inauguraldissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde  
der Universität zu Lübeck  
– Aus der Sektion Medizin –

vorgelegt von

Yasin Aktepe  
aus Hamburg

Lübeck 2020

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Tobias Bäumer

2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. J. Koehler

Tag der mündlichen Prüfung: 2.12.2021

Zum Druck genehmigt: Lübeck, den 2.12.2021

– Promotionskommission der Sektion Medizin –

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1. Einleitung	8
1.1 Die Theory of Event Coding (TEC)	8
1.2 Experimentelle Paradigmen zur Überprüfung der TEC	10
1.3 Relevanz der Paradigma-Übertragung in das somatosensorische System	13
1.4 Das Gilles de la Tourette Syndrom (GTS)	14
1.5 Die TEC als theoretischer Rahmen für das GTS	15
1.6 Methodische Überlegung zur Übertragung der Experimente	18
1.7 Fragestellung	20
2. Methodik	21
2.1 Übergreifende Aspekte für alle durchgeführten Experimente	21
2.2 Experiment 1a und 1b (Finger und Intervall)	26
2.3 Experiment 2a und 2b (Finger und Intervall)	27
2.4 Experiment 3 (Finger)	27
2.5 Experiment 4 (Finger)	28
2.6 Experiment 5a und 5b (Finger und Sequenz)	29
2.7 Experiment 6a und 6b (Finger und Sequenz)	30
2.8 Statistische Auswertung	30
2.9 Hypothesen	32
3. Ergebnisse	33
3.1 Experiment 1a (Finger)	33
3.2 Experiment 1b (Intervall)	36
3.3 Experiment 2a (Finger)	39
3.4 Experiment 2b (Intervall)	42
3.5 Experiment 4 (Finger)	45
3.6 Experiment 5a (Finger)	48
3.7 Experiment 5b (Sequenz)	50
3.8 Experiment 6a (Finger)	53
3.9 Experiment 6b (Sequenz)	57
4. Diskussion	60
4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	60
4.2 Diskussion der Ergebnisse	61
4.3 Stärken und Limitationen	65
4.4 Fazit	68
Literaturverzeichnis	69
Anhang	72
Anhang A1: Studieninformation und Einwilligungserklärung	72
Anhang A2: Sitzungsprotokoll	75
Lebenslauf	77

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die getesteten Versionen in den einzelnen Experimenten. ....	26
Tabelle 2: ANOVA Genauigkeit Experiment 1a (Finger) .....	33
Tabelle 3: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 1a (Finger). ....	34
Tabelle 4: ANOVA Reaktionszeit Experiment 1a (Finger). ....	35
Tabelle 5: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 1a (Finger). ....	35
Tabelle 6: ANOVA Genauigkeit Experiment 1b (Intervall). ....	36
Tabelle 7: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 1b (Intervall). ....	37
Tabelle 8: ANOVA Reaktionszeit Experiment 1b (Intervall). ....	38
Tabelle 9: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 1b (Intervall). ....	39
Tabelle 10: ANOVA Genauigkeit Experiment 2a (Finger). ....	39
Tabelle 11: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 2a (Finger). ....	40
Tabelle 12: ANOVA Reaktionszeit Experiment 2a (Finger). ....	41
Tabelle 13: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 2a (Finger). ....	42
Tabelle 14: ANOVA Genauigkeit Experiment 2b (Intervall). ....	42
Tabelle 15: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 2b (Intervall). ....	43
Tabelle 16: ANOVA Reaktionszeit Experiment 2b (Intervall). ....	44
Tabelle 17: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 2b (Intervall). ....	45
Tabelle 18: ANOVA Genauigkeit Experiment 4 (Finger). ....	45
Tabelle 19: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 4 (Finger). ....	46
Tabelle 20: ANOVA Reaktionszeit Experiment 4 (Finger). ....	47
Tabelle 21: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 4 (Finger). ....	47
Tabelle 22: ANOVA Genauigkeit Experiment 5a (Finger). ....	48
Tabelle 23: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 5a (Finger). ....	49
Tabelle 24: ANOVA Reaktionszeit Experiment 5a (Finger). ....	49
Tabelle 25: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 5a (Finger). ....	50
Tabelle 26: ANOVA Genauigkeit Experiment 5b (Sequenz). ....	51
Tabelle 27: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 5b (Sequenz). ....	52
Tabelle 28: ANOVA Reaktionszeit Experiment 5b (Sequenz). ....	52
Tabelle 29: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 5b (Sequenz). ....	53
Tabelle 30: ANOVA Genauigkeit Experiment 6a (Finger). ....	54
Tabelle 31: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 6a (Finger). ....	55
Tabelle 32: ANOVA Reaktionszeit Experiment 6a (Finger). ....	56
Tabelle 33: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 6a (Finger). ....	56
Tabelle 34: ANOVA Genauigkeit Experiment 6b (Sequenz). ....	57
Tabelle 35: Deskriptive Statistik Genauigkeit Experiment 6b (Sequenz). ....	58
Tabelle 36: ANOVA Reaktionszeit Experiment 6b (Sequenz). ....	58
Tabelle 37: Deskriptive Statistik Reaktionszeit Experiment 6b (Sequenz). ....	59
Tabelle 38: Zusammenfassung der signifikanten Interaktionen über alle Versuchsreihen. ....	60

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Ablauf des visuellen S-R-Paradigmas.....	12
Abbildung 2: Schematische Darstellung von motorischen bzw. verbalen Symptomen des GTS.....	17
Abbildung 3: Darstellung der Anordnung der Elektroden.....	23
Abbildung 4: Schematische Darstellung der S-R-Aufgabe.....	25
Abbildung 5: Genauigkeit Experiment 1a (Finger).....	34
Abbildung 6: Reaktionszeit Experiment 1a (Finger).....	35
Abbildung 7: Genauigkeit Experiment 1b (Intervall).....	37
Abbildung 8: Reaktionszeit Experiment 1b (Intervall).....	38
Abbildung 9: Genauigkeit Experiment 2a (Finger).....	40
Abbildung 10: Reaktionszeit Experiment 2a (Finger).....	41
Abbildung 11: Genauigkeit Experiment 2b (Intervall).....	43
Abbildung 12: Reaktionszeit Experiment 2b (Intervall).....	44
Abbildung 13: Genauigkeit Experiment 4 (Finger).....	46
Abbildung 14: Reaktionszeit Experiment 4 (Finger).....	47
Abbildung 15: Genauigkeit Experiment 5a (Finger).....	48
Abbildung 16: Reaktionszeit Experiment 5a (Finger).....	50
Abbildung 17: Genauigkeit Experiment 5b (Sequenz).....	51
Abbildung 18: Reaktionszeit Experiment 5b (Sequenz).....	53
Abbildung 19: Genauigkeit Experiment 6a (Finger).....	54
Abbildung 20: Reaktionszeit Experiment 6a (Finger).....	56
Abbildung 21: Genauigkeit Experiment 6b (Sequenz).....	57
Abbildung 22: Reaktionszeit Experiment 6b (Sequenz).....	59

## **Abkürzungsverzeichnis**

TEC: *Theory of Event Coding*

GTS: Gilles de la Tourette Syndrom

S-R: *Stimulus-Response*

S: Stimulus

R: Reaktion

DSM: *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*

HRT: *Habit Reversal Training*

CBIT: *Comprehensive Behavioral Intervention for Tics*

ERP: *Exposure and Response Prevention*

M: Mittelwert

SD: *Standard Deviation* (Standardabweichung)

EMG: Elektromyographie

ECG: Elektrokardiographie

EEG: Elektroenzephalographie

mA: Milliampere

TTL-Pulse: Transistor-Transistor-Logik-Pulse

ms: Millisekunde

rep: repetitiv

alt: alternierend

## Zusammenfassung

Die *Theory of Event Coding* (TEC) beschreibt die Interaktion und Kopplung (*Binding*) von Wahrnehmung und Handlung und wurde bislang vor allem in der visuellen Domäne empirisch untersucht. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Übertragung bereits etablierter visuell-motorischer Experimente in ein somatosensorisch-motorisches Paradigma. Insgesamt wurden 81 gesunde Probanden in sechs Experimenten mithilfe einer *Stimulus-Response*-Aufgabe unter Verwendung von elektrotaktiler Stimulation des Handrückens und der Finger untersucht. Hierbei waren die Probanden dazu angeleitet, möglichst schnell und akkurat nach bestimmten Regeln per Tastendruck auf die elektrotaktilen Stimuli zu reagieren. Es wurden über die Experimente hinweg verschiedene Varianten dieser Aufgabe mit geringfügigen Modifikationen hinsichtlich der Reizdarbietung und ihrer Beantwortung verwendet, um ein geeignetes Paradigma zur Induktion von *Binding*-Effekten in der somatosensorischen Modalität zu etablieren. In einigen Experimenten konnten unter bestimmten Bedingungen *Binding*-Effekte im Sinne der TEC beobachtet werden. Dazu gehörte, dass mindestens zwei Stimulusdimensionen des somatosensorischen Reizes variiert werden und dass das Intervall zwischen Stimulus und Reaktion begrenzt ist, was auf eine hohe zeitliche Sensibilität von *Binding*-Prozessen im somatosensorischen System hindeutet. Weiterhin konnten signifikante Wahrnehmungs-Handlungs-Interaktionen vor allem bei antwortrelevanten Stimulusmerkmalen nachgewiesen werden. Im Hinblick auf praktische Implikationen könnte sich die TEC für das Verständnis des Gilles de la Tourette Syndroms als nützlich erweisen, da die Symptomatik unter anderem durch die enge Verknüpfung eines somatosensorischen Vorgefühls mit einer motorischen Tic-Handlung charakterisiert ist. Dies macht die Entwicklung von Experimenten zur Untersuchung von *Binding*-Prozessen im somatosensorischen System auch aus klinischer Perspektive relevant.

## 1. Einleitung

### 1.1 Die Theory of Event Coding (TEC)

Die *Theory of Event Coding* (TEC) versucht zu erklären, wie die Wahrnehmung von Reizen und die Ausführung von motorischen Handlungen kognitiv und neuronal repräsentiert werden. Zudem beschreibt sie, wie die jeweiligen Repräsentationen miteinander interagieren (Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001). Grundlage der Theorie ist die Annahme, dass die verschiedenen Merkmale eines Objekts (z.B. Farbe, Form, Position) einzeln wahrgenommen und räumlich sowie funktional in unterschiedlichen Hirnarealen prozessiert werden. Damit es dennoch zu einer ganzheitlichen Wahrnehmung kommen kann, ist eine Integration aller Merkmale eines Objekts erforderlich. Diese Integration oder Vernetzung bezeichnet man als *Binding*. Das *Binding* ist folglich die Konstruktion eines Gesamt-Eindrucks durch die Integration aller Merkmale eines Stimulus (Hommel, 2004). Neuronal wird dies durch die simultane Aktivität merkmalsensitiver Neuronen ermöglicht (Colzato, 2005). Die TEC geht davon aus, dass Informationen zu allen Merkmalen eines wahrgenommenen Objekts (z.B. ein bestimmter visueller, auditorischer oder haptischer Reiz) in einer episodischen Gedächtnisspur gespeichert werden, die man auch als *Object File* bezeichnet (Colzato, Warrens, & Hommel, 2006).

Parallelen lassen sich auch im motorischen System finden. So wird angenommen, dass alle Merkmale einer Handlung gemeinsam in einem sogenannten *Action File* repräsentiert werden. Dieses *Action File* enthält demnach alle notwendigen Informationen, die für die Ausführung einer motorischen Handlung notwendig sind (Stoet & Hommel, 1999). Die Ähnlichkeiten in der Struktur der wahrnehmungs- und der handlungsbezogenen Kodierung veranlassen zu der Vermutung, dass Wahrnehmung und Handlung nicht getrennt voneinander betrachtet werden sollten. Die TEC stellt hier die Hypothese auf, dass Wahrnehmung und Handlung eine gemeinsame Repräsentation, also eine gemeinsame Kodierung (*Common Code*) haben. Es wird in diesem Rahmen davon ausgegangen, dass Handlungen abhängig von Ihren sensorischen Konsequenzen kodiert werden. Gleichzeitig hängt die Wahrnehmung von Reizen davon ab, mit welchen Handlungen diese verknüpft sind (Hommel et al., 2001). An einem Beispiel veranschaulicht, könnte man sich einen Pianisten vorstellen, der eine Taste auf seinem Klavier anschlägt. Während

der Pianist die Bewegung ausführt, antizipiert er bereits die wahrgenommene Konsequenz seiner Handlung, den durch seine Handbewegung erzeugten Ton. Die Handlung wird also nicht nur abhängig von den Merkmalen der Handlung kodiert, sondern auch abhängig von den sensorischen Informationen, die diese Handlung erzeugt. Andersherum kann die sensorische Wahrnehmung, also das Hören dieses bestimmten Tons, die Kodierung für die Ausführung der damit assoziierten Bewegung aktivieren. Die Wahrnehmung des Stimulus wird also nicht nur abhängig von den Merkmalen desselbigen kodiert, sondern auch abhängig von der motorischen Handlung, die mit diesem Stimulus verknüpft wird. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Prozess der Wahrnehmung Handlung gleichermaßen bedingt und ermöglicht. Eine Handlung durchzuführen beruht auf sensorischen Informationen, aber erzeugt diese auch (Hommel, 2004).

Die TEC postuliert nun im Sinne eines *Common Code*, dass sogenannte *Event Files* existieren. Diese *Event Files* lassen sich als neuronale Netzwerke verstehen und umfassen sensorische und motorische Elemente. Das *Event File* stellt also eine Ansammlung von Bindungen dar, die die Kodierung der relevanten Merkmale eines wahrgenommenen Reizes mit den damit assoziierten Handlungsmerkmalen verknüpft. Im Sinne einer Muster-Vervollständigung (*Pattern Completion*) führt die Aktivierung eines Elements innerhalb des Netzwerks zur Aktivierung aller anderen darin enthaltenen Elemente (Hommel, 2009).

Aufgrund dessen bringt das Phänomen des domänenübergreifenden *Bindings* auch potentielle Konflikte mit sich. Wenn sich zum Beispiel bereits eine Verknüpfung zwischen einem bestimmten Stimulusmerkmal und einer bestimmten Handlung etabliert hat, führt die erneute Darbietung des Stimulusmerkmals aufgrund der Mustervervollständigung zur Aktivierung der damit ursprünglich assoziierten Handlung. Dies stellt ein Problem dar, wenn eine neue andersartige Handlung erforderlich ist (Hommel, 2009). Zur Überprüfung der Merkmalsintegration und damit einhergehender *Binding*-Effekte liegen vor allem für das visuelle System empirische Überprüfungen vor (Colzato et al., 2006). Die experimentellen Paradigmen zu *Object Files*, *Action Files* und *Event Files* sowie deren Ergebnisse sollen im Folgenden vorgestellt werden.

## 1.2 Experimentelle Paradigmen zur Überprüfung der TEC

**1.2.1 Object Files.** Belege für die Merkmalsintegration im visuellen System und somit für die Existenz von *Object Files* konnten sowohl die Versuche von Kahnemann und Kollegen als auch von Hommel liefern (Hommel, 1998; Kahneman, Treisman, & Gibbs, 1992). In den Experimenten von Kahnemann et al. (1992) wurden den Probanden hintereinander zwei visuelle Stimuli (S1 und S2) mit den Merkmalsdimensionen Form und Position dargeboten. Die Aufgabe der Probanden war es, den S2 so schnell wie möglich zu benennen. Es zeigte sich, dass der Identifikationsprozess beschleunigt war, wenn S1 und S2 hinsichtlich ihrer Merkmalsdimensionen übereinstimmten. Die kürzeren Reaktionszeiten bei Merkmalsüberlappungen sind dabei aus Sicht der Autoren darauf zurückzuführen, dass das für S1 gebildete *Object File* für die Benennung von S2 lediglich reaktiviert werden muss.

Darauf aufbauend entwickelte Hommel (1998) ein weiteres experimentelles Paradigma unter Verwendung zweier Stimuli mit nunmehr drei verschiedenen Merkmalsdimensionen (Farbe, Form, Position). Auch hier waren die Probanden dazu angeleitet, möglichst schnell und akkurat auf den zweiten Stimulus (S2) zu reagieren. Die Probanden wiesen sowohl bei vollständiger Merkmalsübereinstimmung zwischen S1 und S2 (Farbe, Form und Position bei S1 und S2 identisch) als auch bei vollständiger Diskrepanz der Merkmalsdimensionen ähnliche Reaktionszeiten auf. Unter diesen beiden Bedingungen waren die Reaktionszeiten deutlich kürzer, als wenn nur eine teilweise Übereinstimmung zwischen den beiden Stimuli gegeben war (z.B. gleiche Form, aber nicht die gleiche Farbe und Position). Dieser Befund deutet darauf hin, dass partielle Wiederholungen von Merkmalen einen Leistungsnachteil in Form erhöhter Reaktionszeiten mit sich bringen.

**1.2.2 Action Files.** Auch zu den von der TEC postulierten Mechanismen in Bezug auf die Integration von Handlungsmerkmalen im Sinne von *Action Files* liegen empirische Belege vor (Hommel, 2004). Demnach kommt es auch bei Handlungsmerkmalen zu *Binding*-Effekten. In den Experimenten zur Überprüfung dieser Hypothese wurden Probanden dazu instruiert, eine rechte oder linke Fingerbewegung (A) vorzubereiten. Im Anschluss führten sie eine weitere Bewegung (B) aus, danach wurde Handlung A vollzogen. Es zeigten sich verlängerte Reaktionszeiten für B im Falle einer teilweisen Merkmalüberlappung zwischen den Handlungen A

und B (Stoet & Hommel, 1999). Dieser Effekt zeigte sich auch, wenn die Bewegungen mit dem Fuß durchgeführt wurden. Zusammenfassend scheint die Bewegung B durch den aktivierten Handlungsplan der Bewegung A erschwert zu sein. Dies ist wiederum mit der Annahme der TEC konsistent, dass ein für die Bewegung B benötigter *Code* „belegt“ war.

**1.2.3 Event Files.** Für die Untersuchung von *Binding*-Effekten zwischen Wahrnehmung und Handlung wurden experimentelle Paradigmen entwickelt, welche im Folgenden vorgestellt werden sollen. Colzato und Kollegen hatte zum Ziel, mit Hilfe von drei Aufgaben die Verknüpfung von Reizmerkmalen in der Wahrnehmung, die Verknüpfung von Aktionsmerkmalen in der Aktionsplanung und die Entstehung von Reizreaktionsbindungen, sogenannten *Event Files*, zu erforschen (Colzato et al., 2006). Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation ist das *Stimulus-Response*-Paradigma (S-R-Paradigma) von Colzato, basierend auf den Versuchen von Hommel sowie von Colzato und Hommel (Hommel, 1998; Hommel & Colzato, 2004). Aus diesem Grund soll lediglich die *Event File*-Aufgabe in ihrem Aufbau vorgestellt werden (Abbildung 1).

Das Experiment ist in drei Reize (Cue=Pfeil, Stimulus 1=Linie und Stimulus 2=Linie) und drei Antwortreaktionen (Reaktion 1, Reaktion 2 und Reaktion 3) gegliedert. Der Versuch wird sitzend vor einem Bildschirm mit Tastatur durchgeführt. Ein Durchgang (*Trial*) besteht dabei aus den oben genannten drei Reizen und drei Antworten. Jeder *Trial* beginnt mit der Darbietung des Cues, einem Pfeil, der entweder nach rechts oder nach links gerichtet ist. Es folgt ein leerer Bildschirm, danach erscheint Stimulus 1 (S1). Nach Erscheinen von S1 sollen die Probanden per Tastendruck reagieren, indem sie abhängig von der Ausrichtung des Cues entweder eine linke oder rechte Taste drücken (Reaktion 1, R1). S1 stellt somit zunächst lediglich ein Startsignal für R1 dar, die Antworttaste wird durch den Cue definiert. Zusätzlich sollen sich die Probanden die Merkmale von S1 merken. Dazu gehört die Farbe (rot oder grün), die Ausrichtung der Linie (horizontal oder vertikal) und die Position (oben oder unten). Wenn R1 falsch oder nicht beantwortet wird, startet die Messung erneut. Im Anschluss an S1 erscheint erneut ein leerer Bildschirm, gefolgt von dem zweiten Stimulus (S2). S2 besteht dabei aus einer Linie, die ebenfalls in Bezug auf die drei verschiedenen Merkmalsdimensionen variieren kann. Im Rahmen der zweiten Reaktion (R2) sollen die Probanden lediglich auf die Ausrichtung von S2 (vertikal oder horizontal) reagieren. Im Anschluss auf R2 folgt

eine Frage zu S1. Hier wird entweder nach der Farbe, der Ausrichtung oder der Position von S1 gefragt. Die letzte erforderliche Reaktion der Probanden, welche sich auf S1 bezieht, wird als R3 bezeichnet. Die letzte Frage dient hier dazu, die Aufmerksamkeit, die S1 gewidmet wird, zu erhöhen. Zudem lässt sich somit die Tiefe der Informationsverarbeitung in Bezug auf S1 überprüfen.

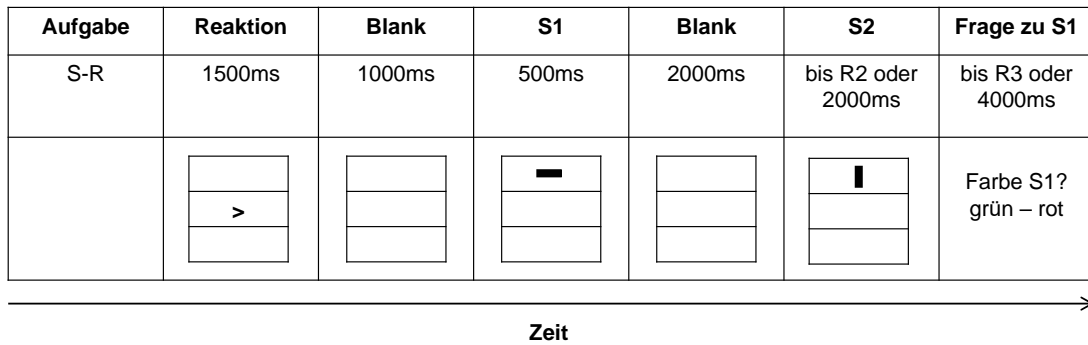


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des visuellen S-R-Paradigmas (Hommel & Colzato, Chapter 1, Fig. 2, 2004).

Der dargestellte Aufbau ermöglicht die Umsetzung verschiedener Kombinationsmöglichkeiten, die, sofern die TEC Gültigkeit besitzt, das Antwortverhalten (Leistungsmaße: Reaktionszeit und Genauigkeit) beeinflussen sollten. So wird angenommen, dass bei einer partiellen Übereinstimmung der im *Event File* enthaltenen Merkmale (Art der Reaktion wiederholt sich, der Stimulus wiederholt sich nicht; oder umgekehrt) das ursprünglich gebildete *Event File* nicht reaktiviert werden kann bzw. neu konfiguriert werden muss. Dies führt wiederum zu erhöhten Reaktionszeiten (Colzato et al., 2006). Wenn dagegen eine vollständige Übereinstimmung erfolgt, das heißt wenn die Stimuli S1 und S2 in ihren handlungsrelevanten Dimensionen identisch sind und gleichzeitig die Reaktionen R1 und R2 übereinstimmen, dann könnte das vorab gebildete *Event File* für die Reaktion auf S2 reaktiviert werden. Hier wären kürzere Reaktionszeiten zu erwarten (Colzato et al., 2006). Ähnlich kurze Reaktionszeiten würden in einem Szenario hypothetisiert werden, in dem eine vollständige Diskrepanz vorliegt. In einer solchen Situation würden sich weder die beiden Stimuli S1 und S2 noch die beiden Reaktionen R1 und R2 gleichen. Zwei verschiedene *Event Files* würden gebildet werden, was laut der TEC weniger Zeit in Anspruch nimmt als ein vorheriges etabliertes *Event File* zu modifizieren, wie es bei der partiellen Übereinstimmung der Fall ist (Hommel, 1998). Im

Folgenden sollen Bedingungen mit vollständiger Übereinstimmung bzw. vollständiger Diskrepanz als *Binding*-kompatibel bezeichnet werden. Bedingungen mit partiellen Übereinstimmungen werden analog als *Binding*-inkompatibel bezeichnet. Die Ergebnisse von Colzato und Kollegen (Colzato et al., 2006) waren hypothesenkonform. Die Reaktionszeiten waren im Falle von partiellen Übereinstimmungen länger als bei einer vollständigen Wiederholung bzw. einer vollständigen Alterierung der Merkmale. Es lässt sich somit der Schluss ziehen, dass der Einfluss, den die Wiederholung eines Stimulusmerkmals auf die Reaktionszeiten hat, davon abhängt, ob sich die Handlung wiederholt oder nicht. Diese Erkenntnis weist darauf hin, dass sowohl Stimulusmerkmale als auch Handlungsmerkmale integriert verarbeitet werden. Dies kann als Beleg für die TEC gelten (Hommel, 2004). Einzuwenden ist, dass die *Binding*-Effekte in den besprochenen visuellen Experimenten nicht immer für alle Merkmalsdimensionen vorhanden waren und zudem von ihrer Aufgabenrelevanz abhingen (Colzato et al., 2006; Hommel, 1998). Ferner konnte gezeigt werden, dass die meisten *Binding*-Effekte auf binäre Interaktionen beschränkt waren, das heißt dass sich kaum Interaktionen höherer Ordnung beobachten ließen. Es kommt dementsprechend meist zu *Binding*-Effekten zwischen zwei und nicht zwischen drei Merkmalen (Colzato et al., 2006).

### 1.3 Relevanz der Paradigma-Übertragung in das somatosensorische System

Wenngleich die dargestellten Versuchsanordnungen eine Möglichkeit bieten, die theoretischen Annahmen der TEC zu überprüfen, muss einwendend betont werden, dass in der Wahrnehmungsdomäne bisher nur visuelle Stimuli untersucht wurden. Aktuell ist unklar, ob *Binding*-Effekte auch zwischen Handlung und anderen sensorischen Systemen, wie etwa dem somatosensorischen System, existieren. Die Verknüpfung von Merkmalen als auch die Kodierung von *Event Files* scheinen universelle Prozesse darzustellen, die nicht zwingend auf die visuelle Modalität beschränkt sein müssen. Somit sollte es prinzipiell auch möglich sein, diese mit somatosensorischen statt mit visuellen Reizen zu untersuchen. Zu Beginn dieser Forschungsarbeit gab es noch kein Experiment, welches die Untersuchung von *Binding*-Effekten zwischen somatosensorischer Wahrnehmung und Handlung ermöglicht. Die Entwicklung eines derartigen Experiments könnte helfen, die Mechanismen des *Bindings* im somatosensorischen System zu erforschen und die TEC auch in dieser Modalität zu validieren. Dies bringt auch praktische

Implikationen mit sich. Beispielsweise könnte die TEC, sofern sie sich im Rahmen der geplanten Experimente auch für das somatosensorische System belegen ließe, einen plausiblen theoretischen Rahmen für das Gilles de la Tourette Syndrom (GTS) bieten.

#### **1.4 Das Gilles de la Tourette Syndrom (GTS)**

Das Gilles de la Tourette Syndrom (GTS) ist eine im Kindesalter beginnende neuropsychiatrische Erkrankung mit einer Prävalenz von 4-5/10000, wobei Männer häufiger betroffen sind. Der Erkrankung liegt eine Störung der motorischen Inhibition zu Grunde, die das kortiko-striato-thalamo-kortikale Regulationssystem beeinflusst. Aufgrund dessen kommt es zu sogenannten Tics, die das Hauptmerkmal der Erkrankung darstellen (Riederer, Stamenkovic, Schindler, & Kasper, 2002). Tics sind nicht willentliche, kurze, motorische und/oder verbale Verhaltensweisen (Stern et al., 2000). Diese Handlungen entsprechen dabei meist gewöhnlichen Verhaltensweisen, wie etwa Zwinkern, Schulterzucken oder Räuspern, erscheinen jedoch hinsichtlich Frequenz und Umgebungskontext inadäquat (Paszek et al., 2010). Die Tics treten meist im Alter von 4-6 Jahren auf, wobei der Höhepunkt hinsichtlich des Schweregrads im Alter von 10-12 Jahren anzusiedeln ist (Bloch & Leckman, 2009). Aufgrund der geschilderten dominanten motorischen Symptomatik wurde das GTS lange Zeit als Bewegungsstörung klassifiziert. Neben der motorischen Komponente rücken jedoch auch sensorische Aspekte der Erkrankung immer stärker in den Fokus. Hier spielt vor allem das sensorische Vorgefühl (*Premotory Urge*), welches dem Tic häufig voraus geht, eine besondere Rolle. Diese sensorischen Phänomene präsentieren sich beispielsweise als Druckgefühl oder Bewegungsdrang, die den Betroffenen dazu veranlassen, den Tic auszuführen (Kwak, Dat Vuong, & Jankovic, 2003). Hieran wird die starke Verbindung zwischen dem somatosensorischen Vorgefühl und der motorischen Tic-Handlung deutlich. Die Ausführung eines Tics unterliegt dabei bestimmten Einflussfaktoren. So konnte gezeigt werden, dass Tics durch Aufmerksamkeitsprozesse beeinflusst sind. So treten bei einer aktiven Steuerung der Aufmerksamkeit nach außen, z.B. bei der Bearbeitung von Konzentrationsaufgaben, nachweislich weniger Tic-Handlungen auf (Herrmann et al., 2019).

Für eine Diagnose nach dem Diagnosesystem *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (DSM-V, American Psychiatric Association, 2013) müssen die

Tics mindestens ein Jahr andauern, vor dem 18. Lebensjahr aufgetreten und nicht sekundär entstanden sein (Hallett, 2015). Hinsichtlich der Ätiologie dominieren nach dem aktuellen Forschungsstand genetische Faktoren, die womöglich epigenetischen Einflüssen unterliegen (Riederer et al., 2002).

Die Therapie umfasst zwei große Säulen, nämlich Verhaltenstherapie und die medikamentöse Therapie. Ob und welche Form der Therapie indiziert ist, hängt von dem erwarteten Kosten-Nutzen-Verhältnis der Behandlung und dem Schweregrad der Störung ab. Aufgrund der Komorbidität mit ADHS, Zwangsstörungen und affektiven Störungen erscheint es sinnvoll, die entsprechende psychiatrische Begleitsymptomatik in der Behandlung mit zu berücksichtigen (Conelea et al., 2013; Müller-Vahl et al., 2010; Riederer et al., 2002). Die Verhaltenstherapie bietet verschiedene Therapieansätze wie etwa das *Habit Reversal Training* (HRT), die *Comprehensive Behavioral Intervention for Tics* (CBIT) oder *Exposure and Response Prevention* (ERP) (Robertson, 2012). Die medikamentöse Therapie findet Anwendung bei psychosozialen Problemen, bei Beeinträchtigung der schulischen/beruflichen Leistung oder bei psychischer Belastung in Form von depressiven Symptomen (Riederer et al., 2002). Vorzugsweise werden zunächst alpha-adrenerge Agonisten gegeben. Der nächste Schritt könnte ein Antipsychotika der zweiten Generation sein (Shaw & Coffey, 2014). Der dritte Schritt wäre ein Antipsychotika der ersten Generation, die zwar stärker sind, aber auch mehr Nebenwirkungen verursachen können (Chen, Ondo, Dashtipour, & Swope, 2012). Außerdem konnte eine Wirksamkeit von Botulinum Toxin auf motorische und sensorische Tics gezeigt werden (Termine, Selvini, Rossi, & Balottin, 2013). Auch Cannabinoide scheinen eine Wirksamkeit bei Tic-Störungen zu haben (Müller-Vahl, 2007). Als *Ultima Ratio* kann ein Hirnschrittmacher, der die Thalamuskern stimuliert, in Betracht gezogen werden (Riederer et al., 2002). In 50% der Fälle verschwinden Tics im Erwachsenenalter, bei 40-45% verbessert sich die Symptomatik und in 5-10% der Fälle persistieren die Symptome (Hallett, 2015).

### **1.5 Die TEC als theoretischer Rahmen für das GTS**

Die vorangehende Beschreibung des GTS macht deutlich, dass sich das Syndrom in den meisten Fällen durch ein wahrgenommenes Vorgefühl und die darauffolgende Tic-Handlung auszeichnet. Die enge Beziehung zwischen dem sensorisch empfundenen Drang und dem motorischen Tic legt ein theoretisches Konzept

nahe, welches sowohl Wahrnehmung als auch Handlung umfasst (Beste & Münchau, 2018). Die *Theory of Event Coding* stellt hier einen plausiblen theoretischen Rahmen dar, da sie perzeptuelle und motorische Aspekte von Handlungen integriert und die Interaktionen zwischen diesen beiden Elementen beschreibt (Hommel et al., 2001).

Wenn man die TEC auf Tic-Störungen überträgt, könnte man das Vorgefühl als *Object File* und die Tic-Handlung als *Action File* interpretieren. Dieser Überlegung folgend sind sowohl das sensorische Vorgefühl als auch die motorische Tic-Handlung in einem gemeinsamen *Event File* repräsentiert. Dieses zeichnet sich wiederum durch eine starke Bindung zwischen den entsprechenden sensorischen und motorischen Elementen aus. Demnach lässt sich das GTS als eine Erkrankung auffassen, die sich durch eine veränderte "Wahrnehmungs-Aktions-Verknüpfung" auszeichnet (Beste & Münchau, 2018; Petruo et al., 2018). Tatsächlich konnte kürzlich unter Verwendung eines visuellen TEC-Paradigmas eine stärkere Bindung zwischen Wahrnehmung und Handlung bei Patienten mit dem Tourette-Syndrom sowohl auf Verhaltens- als auch auf neurophysiologischer Ebene gezeigt werden (Kleimaker et al., 2020). Konkret wird vermutet, dass beim Tourette-Syndrom einzelne sensorische Merkmale von Situationen (z.B. körperliche Empfindungen wie das Vorgefühl oder bestimmte wahrgenommene Umgebungsmerkmale) zusammen mit der Ausführung des motorischen Tics ein *Event File* bilden. Durch die im Rahmen der TEC angenommene Mustervervollständigung kann es sodann bei Auftreten der entsprechenden sensorischen Merkmale automatisch zur Ausführung des Tics kommen. Wie Abbildung 2 zu entnehmen ist, lassen sich nicht nur Tic-Handlungen, sondern auch Echophänomene und Koprophänomene mit der TEC erklären. Hier kann im Falle von Echophänomenen die bei anderen Personen visuell wahrgenommene Bewegung als sensorisches Element und die darauffolgende ausgeführte Bewegung als motorisches Element des *Event Files* gedeutet werden. Bei den Koprophänomenen wird dagegen eine bestimmte Umgebungssituation als sensorisches und der dadurch ausgelöste inadäquate verbale Ausdruck als motorisches Element aufgefasst. Die Bindung zwischen den Elementen des *Event Files* hängt dabei möglicherweise von der kognitiven Kontrolle und Aufmerksamkeit des Individuums ab, wird aber auch von äußeren Faktoren (z.B. äußere Reize, sozialer Kontext, Salienz) und inneren Faktoren (z.B. Tic-

Status, Komorbidität, Stressniveau, genetische Faktoren) beeinflusst (Beste & Münchau, 2018).

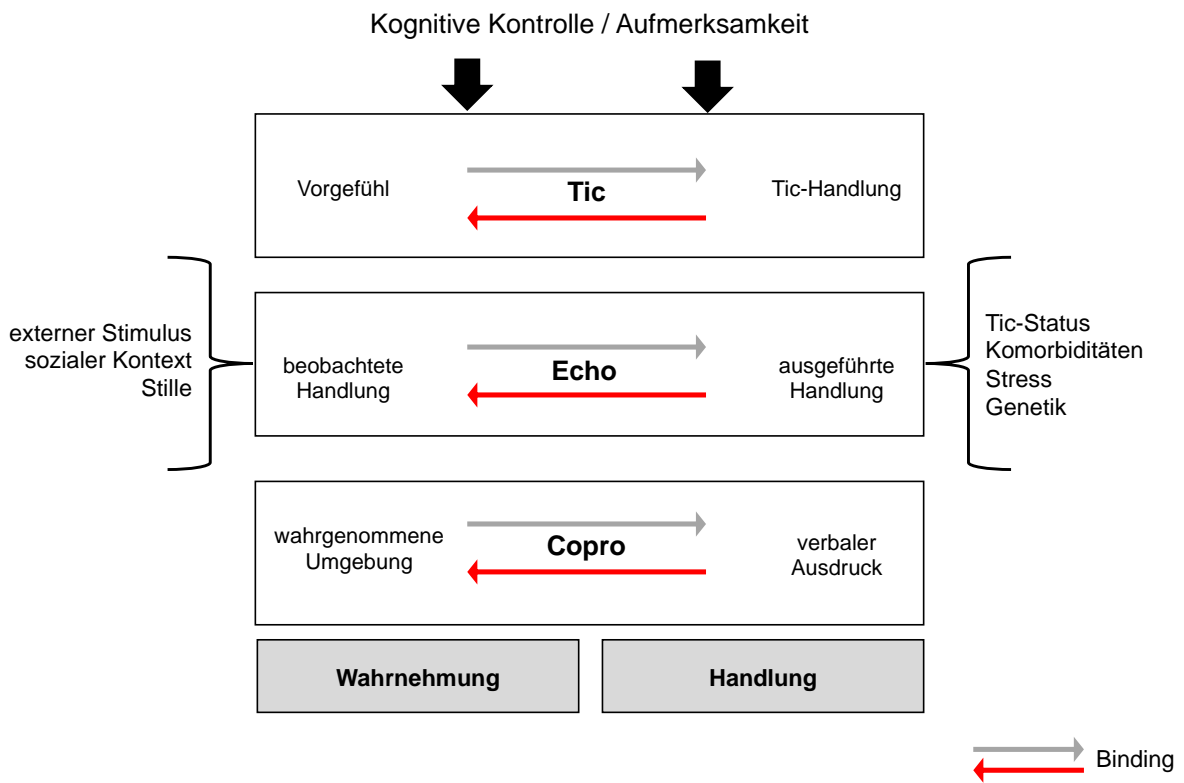


Abbildung 2: Schematische Darstellung von motorischen bzw. verbalen Symptomen des GTS und ihre Interaktion mit sensorischen Prozessen (Beste & Münchau, 2018).

Die Annahmen, die die TEC bei ihrer Anwendung auf Tics trifft, stehen im Einklang mit neurowissenschaftlichen Befunden zu der Störung. So konnte belegt werden, dass die Basalganglien sowie die frontostriatalen Schleifen bei Patienten mit GTS Dysfunktionen aufweisen (Buse, Schoenefeld, Münchau, & Roessner, 2013; Kalanithi et al., 2005). Damit gehen bei Betroffenen Veränderungen im dopaminergen Regelkreis einher (Buse et al., 2013). Im Hinblick auf die Kodierung von *Event Files* gibt es Hinweise darauf, dass diese durch das dopaminerge System reguliert werden (Petruo, Stock, Münchau, & Beste, 2016). Die Basalganglien und die frontostriatalen Schleifen spielen eine wichtige Rolle bei der Auswahl von Handlungen. Diese hängt hierbei sowohl von der Salienz konkurrierender Handlungen als auch von der Integration verschiedener sensorischer Prozesse, die durch phasische dopaminerge Signale vermittelt werden, ab. Ferner enthält das Striatum eine große Anzahl von Neuronen, die sensitiv für sensorischen Input sind (Beste & Münchau, 2018). Zusammenfassend scheinen dopaminerge frontale und striatale Regionen

bei der Verknüpfung zwischen Wahrnehmung und Handlung von Bedeutung zu sein (Nagy, Eördegh, Paróczy, Márkus, & Benedek, 2006). Zugleich werden diese Regionen mit dem GTS in Verbindung gebracht.

### **1.6 Methodische Überlegung zur Übertragung der Experimente in das somatosensorische System**

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war die Übertragung des visuellen S-R-Paradigmas in ein somatosensorisches S-R-Paradigma, um die Gültigkeit der TEC in einem anderen sensorischen System zu überprüfen. Falls die TEC hier anwendbar ist, könnte sie wie dargestellt einen theoretischen Rahmen für das GTS bieten. Dafür bedarf es einer experimentellen Versuchsanordnung, welche somatosensorische Stimuli sowie mit diesen Stimuli verknüpfte Reaktionen beinhaltet. In den bereits dargestellten Experimenten von Hommel und Colzato wurden visuelle Stimuli mit den variierenden Merkmalen Form, Farbe und Position präsentiert (Colzato et al., 2006). Für eine Übertragung des Paradigmas in das somatosensorische System ist es daher grundsätzlich wichtig, eine somatosensorische gut kontrollierbare Reizart zu verwenden, die es ermöglicht, verschiedene Merkmale zu unterscheiden und unabhängig voneinander zu kombinieren. Aus diesem Grund wurde eine Stromapplikation als somatosensorischer Stimulus gewählt.

Es wurde hierbei sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Dimension des Stimulus realisiert. Die räumliche Dimension wurde durch zwei unterschiedliche Stimulationsorte (Daumen bzw. kleiner Finger) umgesetzt. Dies wurde bewusst so gewählt, um einen möglichst großen Abstand zwischen den Fingern zu gewährleisten. Die zeitliche Dimension ergab sich in einigen Experimenten aus der Darbietung zweier aufeinander folgender Stromreize, die mit unterschiedlich großen zeitlichen Abständen dargeboten wurden. In anderen Experimenten wurde eine unterschiedlich große Anzahl an Stromreizen innerhalb einer vorgegebenen Zeit dargeboten. Auf diese Weise konnten räumliche als auch zeitliche Merkmale des somatosensorischen Stimulus – ähnlich wie in Experimenten im visuellen Bereich – verwirklicht werden.

Um eine möglichst genaue Übertragung des visuellen Experimentalansatzes in die somatosensorische Modalität zu erreichen, war das somatosensorische Paradigma in seinem schematischen Aufbau weitgehend identisch mit dem visuellen Paradigma von Hommel (Hommel, 1998). Das bedeutet, dass das Experiment

ebenfalls in Cue, S1, R1, S2, R2 und ggf. R3 unterteilt wurde (siehe Abbildung 4). Um den Cue in die somatosensorische Modalität zu transferieren, wurde anstatt einer Stimulation der Finger eine einfache Stimulation des rechten oder des linken Handrückens gewählt. S1 und S2 wurden als Fingerstimulationen dargestellt, die man anhand ihrer zeitlichen und räumlichen Merkmale unterscheiden konnte. Je nach zeitlichem bzw. räumlichen Merkmal des Stimulus war eine unterschiedliche motorische Reaktion (Drücken einer rechten bzw. linken Taste) erforderlich. Um die Bildung eines *Event Files* im Rahmen der Versuchsanordnung zu veranschaulichen, soll im Folgenden ein exemplarisches Beispiel dem Verständnis dienen: Cue (linker Handrücken), S1 (kurzes Intervall am kleinen Finger), R1 nach links, S2 (langes Intervall am kleinen Finger), R2 rechts (siehe Abbildung 4). Durch den Cue auf dem linken Handrücken müssen die Probanden, sobald S1 erscheint, die linke Taste drücken. S1 wurde in diesem Beispiel am kleinen Finger mit einer Doppelstimulation mit einem kurzen Intervall dargeboten. Nun besagt die *Theory of Event Coding*, dass sich ein *Event File* aus verschiedenen Merkmalen bildet und diese Merkmale in Form eines Netzwerkes miteinander verbunden sind. Die TEC besagt außerdem, dass es zu einer automatischen Aktivierung aller Merkmale des *Event Files* kommt, sobald ein einzelnes Merkmal der Struktur aktiviert wird. Im angeführten Beispiel wird eine motorische Handlung (Druck einer linken Taste) mit den zeitlichen (kurzes Intervall) und räumlichen (kleiner Finger) Merkmalen des sensorischen Stimulus (S1) verknüpft. Im Anschluss erscheint S2 (langes Intervall am kleinen Finger). Laut Versuchsanleitung drücken die Probanden nun die rechte Taste. Gemäß TEC müsste es in diesem Beispiel nun zu einem Leistungs Nachteil hinsichtlich der Reaktionszeit und Genauigkeit kommen. Dies liegt darin begründet, dass sich vorher ein *Event File* mit einer Merkmalsintegration zwischen der motorischen Handlung „Druck einer linken Taste“, der räumlichen Dimension „kleiner Finger“ und der zeitlichen Dimension „kurzes Intervall“ des sensorischen Stimulus gebildet hat. Wenn nun im Rahmen von S2 wieder der kleine Finger stimuliert wird, wird das Merkmal „kleiner Finger“, welches Teil dieses *Event Files* ist aktiviert. Es kommt aufgrund der Mustervervollständigung dann auch zur Bahnung der Reaktion „linker Tastendruck“. Diese Reaktion auf den S2 wäre allerdings ungültig. Um die richtige Reaktion zu zeigen, muss entweder ein neues Merkmal in das alte *Event File* integriert werden oder es muss ein neues *Event File* unter Verwendung eines bereits „belegten“ Merkmals gebildet

werden. Dies ist ein zeitintensiverer Prozess im Vergleich zu einer Situation, in der ein zuvor gebildetes *Event File* für eine gültige Reaktion lediglich reaktiviert werden muss.

### **1.7 Fragestellung**

Auf Basis des vorgestellten Forschungsstandes stellt sich die Frage, ob die TEC auch im somatosensorischen System Gültigkeit besitzt. Zur Überprüfung dieser These wurde das beschriebene visuelle S-R-Paradigma in ein somatosensorisches Paradigma übersetzt. Es wurden elektrotaktile Reize verwendet, die motorische Reaktionen erforderten, wobei die Stimulusdimensionen sowie die antwortrelevanten Dimensionen variierten. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation sollte ein Experiment etabliert werden, anhand dessen sich die durch die TEC vorhergesagten *Binding*-Effekte im somatosensorischen System bei gesunden Probanden induzieren lassen.

## 2. Methodik

### 2.1 Übergreifende Aspekte für alle durchgeführten Experimente

**2.1.1 Ethische Begutachtung.** Die in dieser Arbeit beschriebenen Experimente waren Teil einer größeren Studie. Das Forschungsvorhaben wurde durch die Ethikkommission der Universität zu Lübeck geprüft und am 01. Juni 2017 bewilligt (Aktenzeichen: 17-157).

**2.1.2 Probanden.** In die Experimente eingeschlossen wurden Personen, die folgende Kriterien erfüllten: ein Mindestalter von 18 Jahren, Rechtshändigkeit, keine neurologischen oder psychiatrischen Erkrankungen. Insgesamt wurden 6 Experimente durchgeführt, an denen insgesamt 81 Probanden teilnahmen. Davon waren 49 Frauen und 32 Männer mit einem Durchschnittsalter von  $M=23,95$  ( $SD=3,30$ ). Das Experiment 3 wurde abgebrochen und wird in der folgenden Arbeit daher nur kurz geschildert. Der Großteil der Probanden bestand aus Medizinstudierenden und Psychologiestudierenden an der Universität zu Lübeck.

**2.1.3 Untersuchungsmaterialien.** Alle Experimente fanden in einem EEG-Labor am Institut für Systemische Motorikforschung an der Universität zu Lübeck statt. Für die sensorische Stimulation wurden Stromreize verwendet. Für die Reizung wurden vier Elektrostimulatoren der Firma Digitimer benutzt, die jeweils mit Anode und Kathode an Elektroden befestigt waren. Die Klebeelektroden stammten von der Firma Covidien und werden hauptsächlich für Elektromyographie (EMG), Elektrokardiographie (ECG) und Elektroenzephalographie (EEG) eingesetzt. Es handelte sich um Einmalmaterial mit einer Größe von 30x24 mm. Auf der Rückseite der Elektrode befand sich ein sogenannter *Snap-On-Connector*, der die Verbindung zum Elektrostimulator über ein Kabel ermöglichte. Der Elektrostimulator sendete dabei Elektrostrom durch das Stromkabel an die Klebeelektroden, was schließlich zu einer nervalen Reizung führt. Die Ansteuerung erfolgte über die Parallelportschnittstelle eines Rechners. Zur Programmierung des Experiments wurde die Software Presentation (NeurBS) bzw. Python genutzt.

**2.1.4 Allgemeiner Ablauf und exemplarische Darstellung eines Experiments.** Vor Beginn des Experiments erhielten die Probanden eine Studieninformation und unterschrieben eine Einverständniserklärung (siehe Anhang). Die Instruktion erfolgte persönlich durch den Versuchsleiter. Darauffolgend wurde das Experiment in Form von 16 Probedurchgängen im Beisein des Versuchsleiters geübt.

Außerdem bestand die Möglichkeit, Rückfragen zu stellen. Die erfolgreiche Absolvierung der Probedurchgänge war Voraussetzung für die Teilnahme am Experiment. Diese war gegeben, wenn mindestens 14 von 16 Probedurchgängen fehlerlos durchgeführt wurden.

Vor dem Experiment wurde die Stromstärke individuell angepasst. Ziel der Anpassung bestand darin, eine Stromintensität einzustellen, die an allen Elektrodenpositionen eine konstante empfundene Stärke aufwies. Die Stimulationsintensitäten wurden für jede Elektrodenposition separat bestimmt. Zu diesem Zweck wurde eine sogenannte „*simple-up-down-staircase*“-Methode nach (Leek, 2001) verwendet. Zunächst wurden individuelle Wahrnehmungsschwellen identifiziert. Ausgehend von einem nicht wahrnehmbaren Stimulus (1,0 mA) wurde die Intensität sukzessive in Schritten von 0,5 mA erhöht bis der Stimulus vom Versuchsteilnehmer wahrgenommen wurde. Dann wurde die Intensität um 2 mA erhöht, um einen deutlich überschwelligen Reiz zu gewährleisten. Danach wurde die Intensität in Schritten von 0,5 mA reduziert, bis der Stimulus nicht mehr wahrnehmbar war. Diese Prozedur wurde zweimal durchgeführt. Die resultierenden vier Intensitäten (zwei aus zunehmenden und zwei aus abnehmenden Serien) wurden gemittelt und auf die nächsthöhere Stufe von 0,5 mA aufgerundet, was in individuellen Wahrnehmungsschwellen resultierte. Darauffolgend wurden individuelle Schmerzschwellenwerte definiert. Ausgehend von einem Stimulus mit einer Intensität der zuvor festgelegten Wahrnehmungsschwelle wurde die Intensität sukzessive in Schritten von 0,5 mA erhöht bis der Stimulus als unangenehm empfunden wurde. Die Stimulusintensität wurde auf 20 mA begrenzt. Falls ein Teilnehmer bis zu diesem Wert keine unangenehme Empfindung berichtete, wurde die Schmerzschwelle auf 20 mA eingestellt. Diese Prozedur wurde zweimal durchgeführt. Die resultierenden zwei Intensitäten wurden gemittelt und auf die nächstniedrigere Stufe von 0,5 mA abgerundet, woraus sich die individuellen Schmerzschwellen ergaben. Die tatsächlichen Stimulationsintensitäten für die jeweiligen Stimulationssorte wurden durch Mittelwertbildung der individuellen Wahrnehmungsschwelle und der entsprechenden Schmerzschwelle ermittelt. Die resultierende Intensität wurde geprüft, indem der Teilnehmer gefragt wurde, ob der Stimulus eindeutig wahrnehmbar, aber nicht unangenehm war. Falls erforderlich, wurde die Intensität

angepasst, bis diese Anforderungen erfüllt waren. Wenn keine weiteren Fragen offen waren, verließ der Versuchsleiter den Raum, um potentiell störende Einflüsse zu reduzieren.

Die Probanden führten das Experiment sitzend am Schreibtisch an einem Computer durch, wobei sie an vier Körperstellen mit Elektroden verkabelt wurden. Anode und Kathode befanden sich jeweils mittig an den beiden Handrücken sowie auf der Fingerinnenfläche des Daumens und des kleinen Fingers der rechten Hand (siehe Abbildung 3). Die Programme Presentation bzw. Python sendeten über die Parallelportschnittstelle TTL-Pulse, durch die an den Elektrostimulatoren Reize mit den voreingestellten Parametern ausgelöst wurden. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, auf die elektrischen Reize per Tastendruck möglichst schnell und möglichst akkurat zu reagieren. Das gewünschte Antwortverhalten folgte dabei spezifischen Regeln, die den Probanden vor der Durchführung des Experiments im Rahmen der Instruktion erklärt wurden.

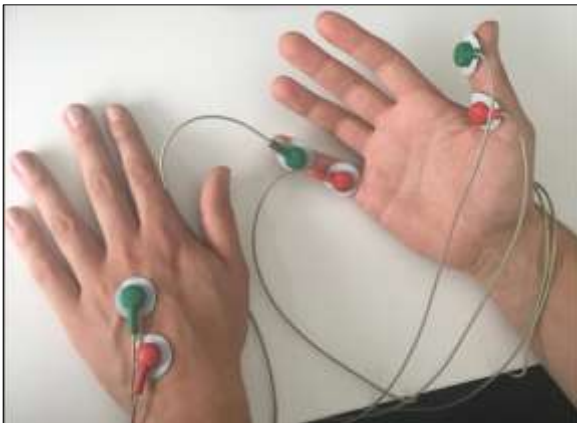


Abbildung 3: Darstellung der Anordnung der Elektroden. Während des Experiments lagen beide Hände mit den Handflächen nach unten, linker und rechter Zeigefinger auf den Reaktionstasten der Tastatur.

Für ein genaueres Verständnis für den Ablauf der Experimente soll im Folgenden exemplarisch das erste Experiment detaillierter beschrieben werden. Spezifische Modifikationen, die für die anderen Experimente vorgenommen wurden, werden in dem jeweiligen Abschnitt vorgestellt.

Im ersten Experiment lagen zwei Varianten (Finger- und Intervall-Variante) vor. Pro Variante wurden 128 *Trials* durch die Probanden absolviert. Die *Trials* wurden dabei in zwei Blöcken à 64 *Trials* durchgeführt, wobei eine kurze Pause zwischen den Blöcken möglich war. Ein *Trial* setzte sich jeweils aus drei Stimuli (Cue, S1,

S2) zusammen (siehe Abbildung 4). Zunächst wurde der Cue dargeboten, der eine Stimulation auf dem rechten oder linken Handrücken darstellte. Nach 2500ms wurde entweder der Daumen oder der kleine Finger der rechten Hand gereizt (S1). Dabei wurden die Finger doppelt stimuliert, entweder mit einem kurzen Intervall zwischen den Reizen (Abstand der Stimuli 100ms) oder mit einem langen Intervall zwischen den Reizen (Abstand der Stimuli 500ms). Direkt nach der Präsentation von S1 sollten die Probanden auf den zuvor dargebotenen Cue reagieren (R1). Hierbei sollten sie bei einer Stimulation des linken Handrückens die linke und bei einer Stimulation des rechten Handrückens die rechte Reaktionstaste betätigen. Zusätzlich sollte sich die räumliche Dimension (Stimulation des Daumens oder des kleinen Fingers) und die zeitliche Dimension (kurzes oder langes Intervall zwischen den Reizen) von S1 gemerkt werden. Im Anschluss an die Darbietung von S1 wurde nach 2500ms der zweite Stimulus (S2) dargeboten. Hier erfolgte erneut eine Reizung eines Fingers, die sich analog zu S1 verhielt. Abhängig von der jeweils durchgeführten Variante des Experiments (Finger- bzw. Intervall-Variante) war eine unterschiedliche Reaktion 2 (R2) auf den Stimulus 2 (S2) erforderlich. In der Finger-Variante sollte auf die räumliche Dimension von S2 reagiert werden. Das bedeutet, dass die Probanden bei einer Stimulation des Daumens die linke und bei einer Stimulation des kleinen Fingers die rechte Reaktionstaste drücken sollten. In der Intervall-Variante sollte auf die zeitliche Dimension von S2 reagiert werden. Bei einem kurzen Intervall zwischen den Reizen sollte die linke und bei einem langen Intervall zwischen den Reizen die rechte Taste betätigt werden. Nach der Reaktion auf S2 wurde zusätzlich eine Frage zu S1 gestellt, die sich entweder auf die räumliche Dimension (Daumen oder kleiner Finger) oder auf die zeitliche Dimension (kurzes oder langes Intervall) von S1 bezog. Im Rahmen einer dritten Reaktion (R3) sollte auch hier per Tastendruck auf die Abschlussfrage reagiert werden. Dieser geschilderte Ablauf: Cue - S1/R1 - S2/R2 – R3 beschreibt zusammenfassend einen *Trial*, welcher mit verschiedenen Stimulus-Möglichkeiten durchgeführt wurde. In der folgenden Abbildung ist das Experiment graphisch veranschaulicht.

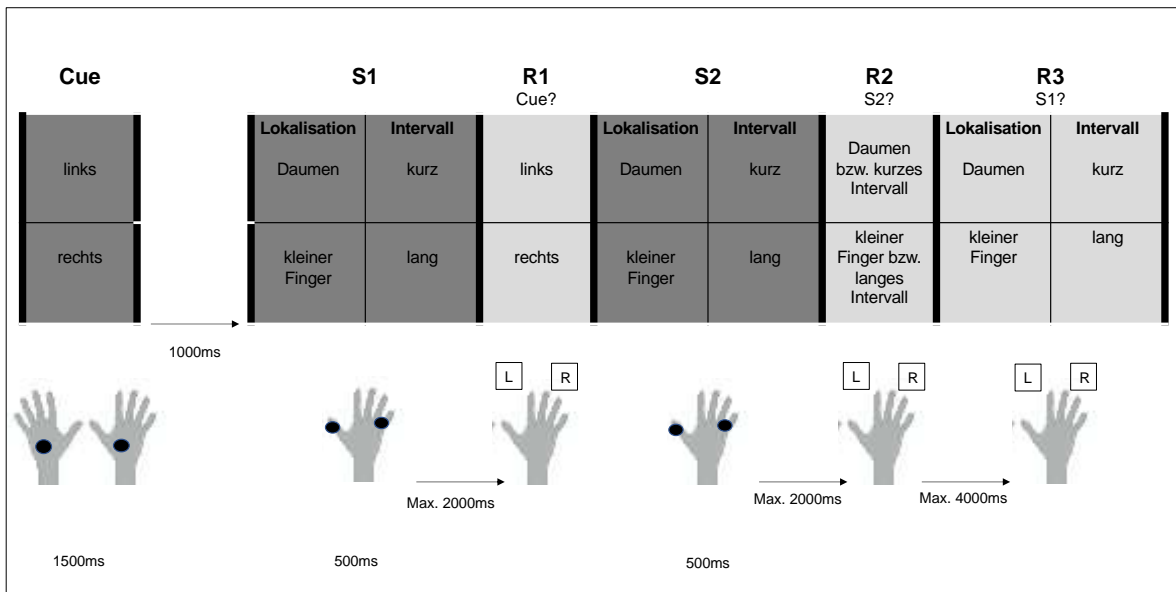


Abbildung 4: Schematische Darstellung der S-R-Aufgabe.

**2.1.5 Übersicht über die durchgeführten Experimente.** Zusammenfassend wurde das erste Experiment für jeden Probanden sowohl in der Finger- als auch in der Intervall-Variante durchgeführt. Am Ende wurde eine Abschlussfrage gestellt und es war eine dritte Reaktion (R3) erforderlich. Dies war allerdings nicht bei allen durchgeführten Experimenten der Fall. Versionen des Experiments, bei denen am Ende eine Abschlussfrage gestellt wurde, werden fortan als *Voluntary*-Version des Experiments bezeichnet. Versionen des Experiments, bei denen keine Abschlussfrage gestellt wurde, sollen als *Automatic*-Version bezeichnet werden. Die Begrifflichkeiten *Automatic* und *Voluntary* beziehen sich dabei auf die Verknüpfung zwischen S1 und R1. Diese läuft in der *Automatic*-Aufgabe im Gegensatz zu der *Voluntary*-Aufgabe „automatisch“ ab, das heißt ohne gerichtete Aufmerksamkeit auf S1.

Ferner gab es in anderen Experimenten Unterschiede hinsichtlich der Charakteristika der Stromapplikation der Finger. Im ersten Experiment wurden die Finger doppelt stimuliert, entweder mit einem kurzen oder langen Intervall zwischen den Reizen. Entweder sollten die Probanden auf die Länge des Intervalls zwischen den zwei Reizen (Intervall-Variante) oder auf den Finger (Finger-Variante) reagieren. Im vierten Experiment dahingegen wurden die Finger nur einfach stimuliert. In den Experimenten 5 und 6 wurde ebenfalls keine Intervall-, sondern eine sogenannte Sequenz-Variante umgesetzt. Diese war durch eine Doppel-Stimulation oder eine

Mehrfach-Stimulation innerhalb einer konstanten Zeitspanne charakterisiert. Welche Versionen des Experiments getestet wurden, lässt sich Tabelle 1 entnehmen. Der genaue Versuchsablauf für die einzelnen Experimente ist in dem jeweiligen Abschnitt beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht über die getesteten Versionen in den einzelnen Experimenten.

Experiment	Version	Varianten
1	<b>Voluntary</b> (mit Abschlussfrage)	a) <b>Finger</b> (Wurde der Daumen o. der kleine Finger stimuliert?)
		b) <b>Intervall</b> (Langes o. kurzes Intervall zwischen den Reizen?)
2	<b>Automatic</b> (ohne Abschlussfrage)	a) <b>Finger</b> (Wurde der Daumen o. der kleine Finger stimuliert?)
		b) <b>Intervall</b> (Langes o. kurzes Intervall zwischen den Reizen?)
3	<b>Automatic</b> (ohne Abschlussfrage)	<b>Finger</b> (Wurde der Daumen o. der kleine Finger stimuliert?) → <b>Experiment ausgeschlossen</b>
4	<b>Automatic</b> (ohne Abschlussfrage)	<b>Finger</b> (Wurde der Daumen o. der kleine Finger stimuliert?)
5	<b>Automatic</b> (ohne Abschlussfrage)	a) <b>Finger</b> (Wurde der Daumen o. der kleine Finger stimuliert?)
		b) <b>Sequenz</b> (Wurde der Finger doppelt o. mehrfach stimuliert?)
6	<b>Voluntary</b> (mit Abschlussfrage)	a) <b>Finger</b> (Wurde der Daumen o. der kleine Finger stimuliert?)
		b) <b>Sequenz</b> (Wurde der Finger doppelt o. mehrfach stimuliert?)

## 2.2 Experiment 1a und 1b (Finger und Intervall)

**2.2.1 Probanden.** Die Messungen für das erste Experiment fanden im Sommer 2017 statt. An dem ersten Experiment nahmen 14 Personen teil. Unter den Teilnehmern waren 6 Frauen und 8 Männer, mit einem Durchschnittsalter von  $M=24,71$  ( $SD=2,49$ ). Alle Probanden waren Studierende an der Universität zu Lübeck. Aufgrund hoher Fehlerraten bzw. aufgrund zu früh gegebener Antworten wurden in der Finger-Variante drei Personen ausgeschlossen, sodass lediglich 11 Versuchspersonen in den Analysen berücksichtigt wurden. In der Intervall-Variante wurde eine Person ausgeschlossen, sodass hier 13 Personen in die Analyse eingeschlossen wurden.

**2.2.2 Ablauf.** Im ersten Experiment wurde die *Voluntary*-Version dargeboten. Die R2-relevante Dimension war entweder der Finger (Finger-Variante) oder

das Intervall (Intervall-Variante). Jeder Proband durchlief nacheinander beide Varianten des Experiments. Mit welcher Variante ein einzelner Proband begann, wurde alternierend durch den Versuchsleiter bestimmt. Insgesamt dauerte das Experiment in etwa 50 Minuten. Es wurden pro Variante 16 Übungs-*Trials* und 128 experimentelle *Trials* durchgeführt, die in zwei Blöcken dargeboten wurden. Für den genauen Ablauf des Experiments sei auf den vorherigen Abschnitt verwiesen.

### 2.3 Experiment 2a und 2b (Finger und Intervall)

**2.3.1 Probanden.** Am zweiten Experiment nahmen 10 Personen teil. Der Zeitraum der Messungen erstreckte sich vom Sommer 2017 bis Herbst 2017. Unter den Teilnehmern waren 2 Frauen und 8 Männer mit einem Durchschnittsalter von  $M=26,2$  ( $SD=1,81$ ). Alle Probanden waren Studierende an der Universität zu Lübeck. Aufgrund hoher Fehlerraten bzw. aufgrund zu früh gegebener Antworten wurde in der Finger-Variante eine Person ausgeschlossen, sodass lediglich 9 Versuchspersonen in den Analysen berücksichtigt wurden. In der Intervall-Variante wurden zwei Personen ausgeschlossen, sodass hier 8 Personen in die Analyse eingeschlossen wurden.

**2.3.2 Ablauf.** Im zweiten Experiment durchliefen alle Probanden weiterhin die zwei unterschiedlichen Varianten des Experiments, das heißt, die Finger- und die Intervall-Variante. Eine wichtige Änderung in diesem Experiment war das Weglassen der Abschlussfrage. Dementsprechend fand hier die *Automatic*-Version des Experiments Anwendung. Durch das Weglassen der Abschlussfrage wurde die Versuchslänge auf 40-45 Minuten verkürzt. Es wurden pro Variante 16 Übungs-*Trials* und 128 experimentelle *Trials* durchgeführt, die in zwei Blöcken dargeboten wurden. Die Modifikation des Experiments im Sinne des Weglassens der Abschlussfrage wurde vorgenommen, um zu überprüfen, ob *Binding*-Effekte auch ohne explizite Aufmerksamkeitslenkung auf S1 zu beobachten sind. Ansonsten war das Experiment identisch zu dem Vorherigen.

### 2.4 Experiment 3 (Finger)

**2.4.1 Probanden.** Bei der Durchführung des dritten Experiments waren nach der Testung von 7 Probanden keine Hinweise für *Binding*-Effekte feststellbar. Aufgrund dessen wurde das dritte Experiment ausgeschlossen und soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

**2.4.2 Ablauf.** Das dritte Experiment wurde in der *Automatic*-Version durchgeführt, das heißt, es erfolgte keine Abschlussfrage. Eine wesentliche Änderung zu den vorherigen Experimenten war, dass hier lediglich die Finger-Variante durchgeführt wurde, das heißt die Probanden antworteten bei R2 lediglich auf den Finger. Eine weitere Änderung betraf die zeitliche Dimension des Stimulus. Im dritten Experiment wurden die Stimuli, wie auch in den Experimenten 1 und 2, durch ein Intervall getrennt dargeboten. Dieses Intervall war allerdings entweder 50 oder 100ms lang, sodass der Unterschied subjektiv nicht wahrnehmbar war. Aufgrund der Tatsache, dass hier lediglich die Finger-Variante des Experiments durchgeführt wurde, war eine Reaktion in Abhängigkeit der Art des Intervalls ohnehin nicht notwendig.

## 2.5 Experiment 4 (Finger)

**2.5.1 Probanden.** Am vierten Experiment nahmen 13 Personen teil. Der Zeitraum der Messungen erstreckte sich vom Herbst 2017 bis Winter 2017. Unter den Teilnehmern waren 8 Frauen und 5 Männer mit einem Durchschnittsalter von  $M=24,46$  ( $SD=2,50$ ). Die Teilnehmergruppe bestand aus Psychologiestudierenden (<4 Fachsemester) und Medizinstudierenden der Universität zu Lübeck. In diesem Experiment wurde kein Proband ausgeschlossen.

**2.5.2 Ablauf.** Das vierte Experiment wurde ebenfalls in der *Automatic*-Version durchgeführt, das heißt, es erfolgte keine Abschlussfrage. Eine wesentliche Änderung des vierten Experiments gegenüber dem ersten Experiment war die einfache Stimulation der Finger (auch als *Single-Puls* bezeichnet). Zuvor wurden die Finger stets doppelt stimuliert, nun erfolgte eine einfache Stimulation. Das Experiment wurde lediglich in der Finger-Variante durchgeführt (R2-relevante Stimulusdimension: Finger). Aufgrund der Tatsache, dass die Finger nur noch einfach stimuliert wurden und die Probanden somit nicht mehr auf das Intervall achten mussten, wurde das Experiment nochmals vereinfacht. Dies sollte die korrekte Bearbeitung der Aufgabe fördern, was wiederum die Anzahl der zu analysierenden Datenmenge erhöht, da lediglich *Trials* mit korrekter Reaktion 2 (R2) ausgewertet wurden. Die Versuchslänge betrug in etwa 40-45 Minuten. Es wurden 16 Übungs-*Trials* und 256 experimentelle *Trials* durchgeführt, die in vier Blöcken à 64 *Trials* dargeboten wurden.

## 2.6 Experiment 5a und 5b (Finger und Sequenz)

**2.6.1 Probanden.** An dem fünften Experiment nahmen 21 Personen teil, wobei jedoch eine Person aufgrund hoher Fehlerraten oder zu früh gegebener Antworten ausgeschlossen wurde. Somit wurden 20 Personen in die Analysen miteinbezogen. Unter diesen 20 Probanden waren 15 Frauen und 5 Männer. Das Durchschnittsalter betrug  $M=22,35$  ( $SD=2,74$ ). Alle Teilnehmer waren Studierende an der Universität zu Lübeck. Der Zeitraum der Messungen erstreckte sich vom Frühjahr 2018 bis Winter 2018.

**2.6.2 Ablauf.** Das fünfte Experiment fand in der *Automatic*-Version (ohne Abschlussfrage) statt. Alle Probanden absolvierten die Finger-Variante des Experiments (R2-relevante Stimulusdimension: Finger). Zudem führten 10 von den 20 Probanden neben der Finger-Variante zusätzlich die hier erstmalig eingesetzte Sequenz-Variante durch (R2-relevante Stimulusdimension: Sequenz). Das fünfte Experiment unterschied sich von den vorherigen Experimenten durch die Art der Stimulation. Zuvor wurden die Finger zweifach stimuliert, wobei die Abstände zwischen den zwei Reizen unterschiedlich lang waren (kurzes bzw. langes Intervall). In diesem Experiment wurden die Finger entweder doppelt oder mehrfach stimuliert. Die doppelte Stimulation stellte einen Stimulus mit zwei aufeinanderfolgenden Reizen dar, die einen Abstand von 167ms aufwiesen (6Hz), was in einer Gesamtreizdauer von 167ms resultierte. Die mehrfache Stimulation setzte sich aus vier Reizen zusammen, die jeweils in einem Abstand von 83ms dargeboten wurden (12Hz), was eine Gesamtreizdauer von 250ms ergab. Dies ermöglichte, wie auch in vorherigen Experimenten, die Etablierung einer zeitlichen Dimension des Stimulus mit zwei Ausprägungen: Doppel- vs. Mehrfach-Stimulation. Allerdings bot das vorliegende Experiment den Vorteil, dass beide Stimuli ähnlich lang waren. Des Weiteren wurde das Experiment in mehrere Blöcke à 64 *Trials* aufgeteilt. Zwischen den Blöcken gab es eine kurze Unterbrechung und der Proband war dazu angeleitet, selbstständig von Block zu Block zu navigieren. Insgesamt wurden in der Finger-Variante des Experiments 256 experimentelle *Trials* durchgeführt. In der Sequenz-Variante, die die Hälfte der Probanden zusätzlich absolvierte, wurden weitere 128 *Trials* absolviert. Zuvor hatten die Teilnehmer anhand von jeweils 16 Übungs-*Trials* die Möglichkeit, die Aufgabe zu trainieren. Abgesehen von den Änderungen in Bezug auf die Art der Stimulation wurden die Untersuchungsbedin-

gungen standardisiert. So wurde der Raum abgedunkelt, damit die Lichtverhältnisse stets konstant waren. Zusammenfassend verfolgte die Konstanthaltung der Stimuluslänge und die Standardisierung der Versuchsbedingungen das Ziel, die interne Validität des Experiments zu erhöhen.

## 2.7 Experiment 6a und 6b (Finger und Sequenz)

**2.7.1 Probanden.** Am sechsten Experiment nahmen 23 Personen teil, wobei drei Personen von den Analysen ausgeschlossen wurden. Von den verbleibenden 20 Probanden waren 16 Frauen und 4 Männer. Das Durchschnittsalter betrug  $M=22,85$  Jahre ( $SD=3,17$ ). Das sechste Experiment wurde in dem gleichen Zeitraum wie das fünfte Experiment durchgeführt, das heißt zwischen Frühjahr und Winter 2018.

**2.7.2 Ablauf.** Es wurde die *Voluntary*-Version des Experiments (mit Abschlussfrage) durchgeführt. Alle Probanden absolvierten die Finger-Variante des Experiments (R2-relevante Stimulusdimension Finger). Zudem führten 11 von den 20 Probanden neben der Finger-Variante zusätzlich die oben beschriebene Sequenz-Variante durch (R2-relevante Stimulusdimension Sequenz). Ansonsten unterschied sich das sechste Experiment hinsichtlich des Ablaufs nicht von dem fünften Experiment.

## 2.8 Statistische Auswertung

Für alle Analysen wurden  $p$ -Werte unter einer Schwelle von 0,05 als statistisch signifikant angesehen. In jedem Experiment gab es zwei abhängige Variablen, die Genauigkeit und die Reaktionszeit der Reaktion 2 (R2). Die Genauigkeit wurde erfasst, indem zunächst alle *Trials* mit einer falschen oder zu früh gezeigten R1 (Reaktion auf Cue + S1) ausgeschlossen wurden. Von den verbleibenden *Trials* wurde sodann die Prozentzahl korrekter R2 (Reaktion auf Stimulus 2) ermittelt und als Wert für die Genauigkeit der R2 verwendet. Die Reaktionszeit wurde erfasst, indem auf der Grundlage der korrekten Reaktionen die Latenz zwischen dem Ende des S2 und der R2 in Millisekunden gemessen wurde. Die Reaktionszeit wurde dabei auf zwei verschiedene Weisen transformiert. Zunächst wurde die Reaktionszeit log-transformiert, um die Verteilungseigenschaften (z.B. Normalverteilung der Residuen) zu verbessern (Riedwyl, 2013). Anschließend wurde der Median des logarithmierten Werts verwendet, um den Einfluss von Ausreißern zu minimieren. Hinsichtlich des statistischen Verfahrens wurde im ersten Experiment sowohl für

die Intervall- als auch für die Finger-Variante eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Die Faktoren waren das Intervall, der Finger und die Reaktion. Alle drei Faktoren lagen in zwei Stufen vor. Der Faktor Intervall konnte in Bezug auf die Relation zwischen S1 und S2 repetitiv (rep) oder alternierend (alt) sein. Das bedeutet, dass sich das dargebotene Intervall von S1 bei S2 entweder wiederholte (z.B. zweimal Darbietung eines kurzen Intervalls) oder sich unterschied (z.B. bei S1 Darbietung eines kurzen Intervalls und bei S2 Darbietung eines langen Intervalls). Der Faktor Finger lag ebenfalls in den beschriebenen zwei Stufen (repetitiv bzw. alternierend) vor. Entweder wiederholte sich der Finger bei S1 und S2 (z.B. zweimalige Stimulation des Daumens) oder der Finger veränderte sich (z.B. Stimulation des Daumens bei S1 und Stimulation des kleinen Fingers bei S2). Auch der Faktor Reaktion lag in den beschriebenen zwei Stufen vor. Entweder waren die Reaktionen 1 und 2 gleich (z.B. zweimaliges Drücken der rechten Antworttaste) oder sie unterschieden sich (z.B. Drücken der rechten Antworttaste im Rahmen von R1 und Drücken der linken Taste im Rahmen von R2). Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden für jede mögliche Kombination der Ausprägungen der Faktoren Intervall, Finger und Reaktion die Reaktionszeiten und die Genauigkeit der Antworten berechnet. Ein Hinweis für das Vorliegen von *Binding*-Effekten zwischen Wahrnehmung und Handlung liegt dabei vor, wenn entweder die Interaktion Reaktion x Finger oder die Interaktion Reaktion x Intervall bzw. Sequenz signifikant wird (Colzato et al., 2006).

Für das zweite Experiment, das sich durch das Weglassen der Abschlussfrage vom ersten Experiment unterschied, wurden die gleichen statistischen Verfahren wie oben beschrieben angewendet. Wie auch beim ersten Experiment wurde die Analyse getrennt für die Finger- und die Intervall-Variante durchgeführt.

Die Datenanalyse des dritten Experiments wird aufgrund fehlender Hinweise für *Binding*-Effekte im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Beim vierten Experiment wurde lediglich die Finger-Variante durchgeführt. Aufgrund dessen wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Die Faktoren waren hier der Finger und die Reaktion. Beide Faktoren konnten in den beschriebenen zwei Stufen, repetitiv oder alternierend, vorliegen.

Für das fünfte und sechste Experiment wurde erneut eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Auch hier wurden die Analysen getrennt für die Finger- und die Sequenz-Variante des Experiments durchgeführt. Die

drei Faktoren waren der Finger, die Sequenz (Doppel- oder Mehrfach-Stimulation) und die Reaktion. Die Analysen erfolgten analog zum ersten Experiment. Alle statistischen Analysen wurden mit der Software R durchgeführt (<https://www.R-project.org/>).

## 2.9 Hypothesen

**Hypothese 1.** Die Reaktionszeit ist von der Interaktion der Stimulusmerkmale (Finger und Intervall/Sequenz) mit den Handlungsmerkmalen (Reaktion) abhängig. Dabei ist die Reaktionszeit geringer, wenn sich die Stimulus- und Handlungsmerkmale vollständig wiederholen oder sich vollständig unterscheiden (*Binding*-kompatible Bedingungen) im Vergleich zu einer teilweisen Überschneidung (*Binding*-inkompatible Bedingungen). Dementsprechend wird die Hypothese aufgestellt, dass in Bezug auf die Reaktionszeit eine signifikante Interaktion zwischen Finger und Reaktion sowie zwischen Intervall/Sequenz und Reaktion vorliegt.

**Hypothese 2.** Die Genauigkeit der Reaktion ist von der Interaktion der Stimulusmerkmale (Finger und Intervall/Sequenz) mit den Handlungsmerkmalen (Reaktion) abhängig. Dabei ist die Genauigkeit in *Binding*-kompatiblen Bedingungen höher als in *Binding*-inkompatiblen Bedingungen. Dementsprechend wird die Hypothese aufgestellt, dass in Bezug auf die Genauigkeit eine signifikante Interaktion zwischen Finger und Reaktion sowie zwischen Intervall/Sequenz und Reaktion vorliegt.

Grundsätzlich wird somit angenommen, dass Stimulus-Reaktions-Bindungen auch für somatosensorische Stimuli existieren, jedoch nicht notwendigerweise für alle Stimulusdimensionen und wahrscheinlich in Abhängigkeit von der Antwortrelevanz der Merkmalsdimensionen.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Experiment 1a (Finger)

**3.1.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 2) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Intervall ( $F(1,10)=8,86$ ,  $p=0,014$ ). Das bedeutet, dass eine Wiederholung oder Veränderung des Intervalls, unabhängig von der Ausprägung der anderen Faktoren, die Genauigkeit der Reaktion 2 signifikant beeinflusste. Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 3) konnte gezeigt werden, dass bei Bedingungen, in denen sich das Intervall wiederholte (repl) die Genauigkeit höher war als in Bedingungen, in denen sich das Intervall nicht wiederholte (altl). Dies wurde auch anhand der graphischen Analyse der Daten deutlich (Abbildung 5). Ferner wurde die Interaktion zwischen den Faktoren Finger und Reaktion signifikant ( $F(1,10)=7,98$ ,  $p=0,018$ ). Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 3) ergaben sich Hinweise darauf, dass die Genauigkeit in *Binding*-kompatiblen Bedingungen höher war als in *Binding*-inkompatiblen Bedingungen. Wie bereits beschrieben ist diese signifikante Interaktion als Indiz für Stimulus-Reaktions-Binding zu deuten. Die weiteren untersuchten Haupteffekte und Interaktionen zeigten keine statistische Signifikanz.

Tabelle 2: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 1a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	$F(1,10)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	2,44	0,149	
Finger	0,27	0,614	
Intervall	8,86	0,014	*
Reaktion x Finger	7,98	0,018	*
Reaktion x Intervall	0,70	0,422	
Finger x Intervall	0,65	0,440	
Reaktion x Finger x Intervall	0,85	0,378	

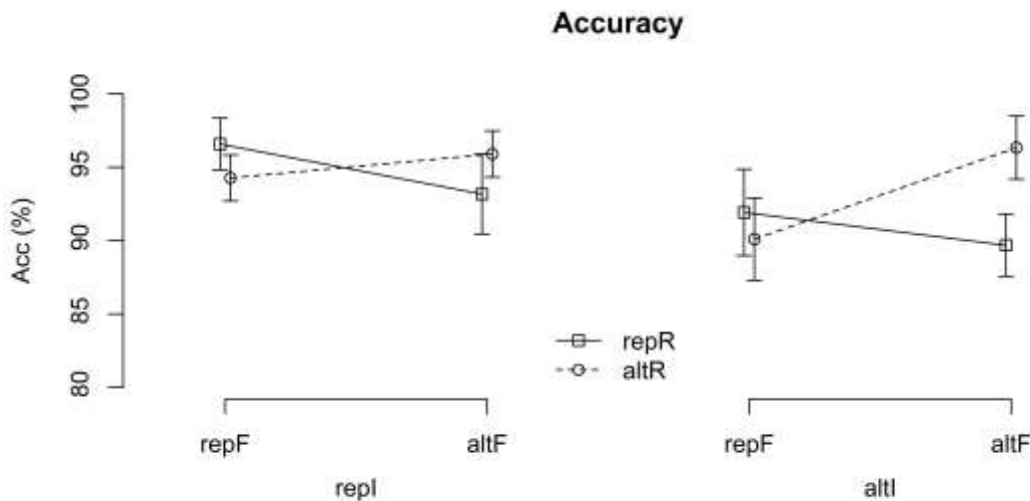


Abbildung 5: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 1a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 3: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent ( $M$ ) und der Standardabweichung ( $SD$ ) für die abhängige Variable Genauigkeit bei  $N=11$  Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	$M$	$SD$
repF	repl	repR	96,59	5,84
repF	repl	altR	94,28	5,20
repF	altl	repR	91,93	9,75
repF	altl	altR	90,11	9,32
altF	repl	repR	93,18	9,04
altF	repl	altR	95,91	5,22
altF	altl	repR	89,70	7,03
altF	altl	altR	96,35	7,13

**3.1.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 4) zeigte eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Reaktion und Finger ( $F(1,10)=50,04$ ,  $p<0,001$ ). Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 5) konnte gezeigt werden, dass bei *Binding*-kompatiblen Bedingungen eine geringere Reaktionszeit vorlag im Vergleich zu *Binding*-inkompatiblen Bedingungen. Dies wird durch die graphische Darstellung der Ergebnisse (Abbildung 6) bestätigt. Die signifikante Interaktion zwischen Reaktion und Finger deutet auf einen *Binding*-Effekt zwischen einem sensorischen Stimulusmerkmal (Finger) und einem handlungsbezogenen Reaktionsmerkmal

(Reaktion) hin. Die weiteren untersuchten Haupteffekte und Interaktionen erzielten keine Signifikanz.

Tabelle 4: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 1a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	$F(1,10)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	1,71	0,221	
Finger	3,20	0,104	
Intervall	0,08	0,779	
Reaktion x Finger	50,04	<0,001	*
Reaktion x Intervall	0,78	0,397	
Finger x Intervall	0,17	0,691	
Reaktion x Finger x Intervall	0,01	0,909	

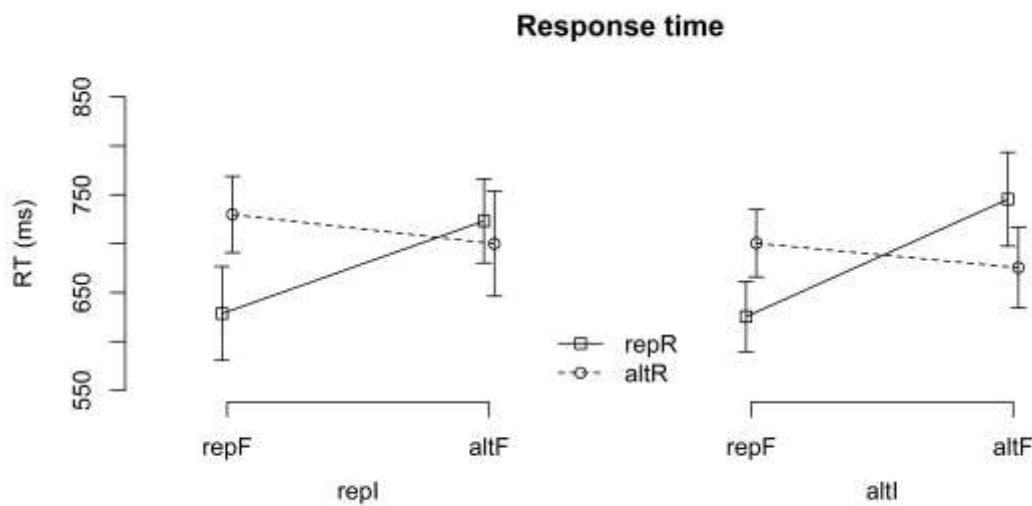


Abbildung 6: Reaktionszeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 1a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 5: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=11 Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	M	SD
repF	repl	repR	628,70	159,00
repF	repl	altR	730,00	129,40
repF	atll	repR	625,50	199,40
repF	atll	altR	700,50	114,10
altF	repl	repR	723,30	142,60
altF	repl	altR	700,10	178,00
altF	atll	repR	745,50	159,00
altF	atll	altR	675,50	136,50

### 3.2 Experiment 1b (Intervall)

**3.2.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 6) zeigte keine signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen. Abbildung 7 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Tabelle 7 enthält die deskriptive Statistik.

Tabelle 6: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 1b (Intervall) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	F(1,12)	p	p<0,05
Reaktion	0,11	0,750	
Finger	2,91	0,114	
Intervall	0,28	0,609	
Reaktion x Finger	0,03	0,860	
Reaktion x Intervall	2,28	0,157	
Finger x Intervall	0,72	0,413	
Reaktion x Finger x Intervall	0,34	0,572	

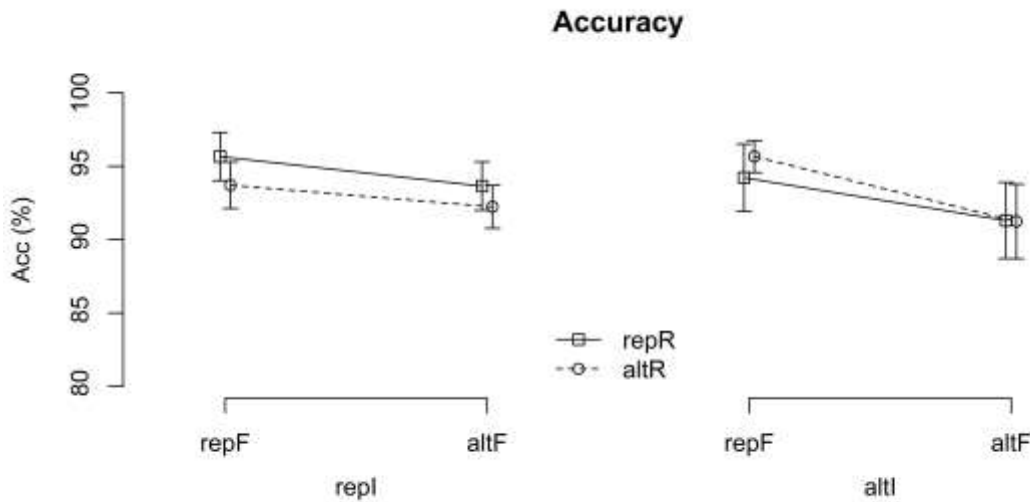


Abbildung 7: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 1b (Intervall). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent ( $M$ ) und der Standardabweichung ( $SD$ ) für die abhängige Variable Genauigkeit bei  $N=13$  Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	$M$	$SD$
repF	repl	repR	95,67	5,92
repF	repl	altR	93,72	5,71
repF	altl	repR	94,23	8,25
repF	altl	altR	95,67	3,94
altF	repl	repR	93,65	5,94
altF	repl	altR	92,24	5,27
altF	altl	repR	91,31	9,38
altF	altl	altR	91,25	9,16

**3.2.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 8) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für das Intervall ( $F(1,12)=15,24$ ,  $p=0,002$ ). Das bedeutet, dass der Faktor Intervall, unabhängig von der Ausprägung der anderen Faktoren, die Reaktionszeit der Reaktion 2 signifikant beeinflusste. Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 9) zeigt sich, dass die Reaktionszeit bei Bedingungen, in denen das Intervall alterniert (altl), geringer ausfällt als bei Bedingungen, in denen sich das Intervall wie-

derholt (repl). Abbildung 8 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden, die diesen Befund stützt. Die weiteren untersuchten Haupteffekte und Interaktionen erzielten keine Signifikanz.

Tabelle 8: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 1b (Intervall) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	$F(1,12)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	0,00	0,969	
Finger	0,28	0,608	
Intervall	15,24	0,002	*
Reaktion x Finger	0,57	0,466	
Reaktion x Intervall	1,75	0,210	
Finger x Intervall	0,64	0,439	
Reaktion x Finger x Intervall	0,22	0,648	

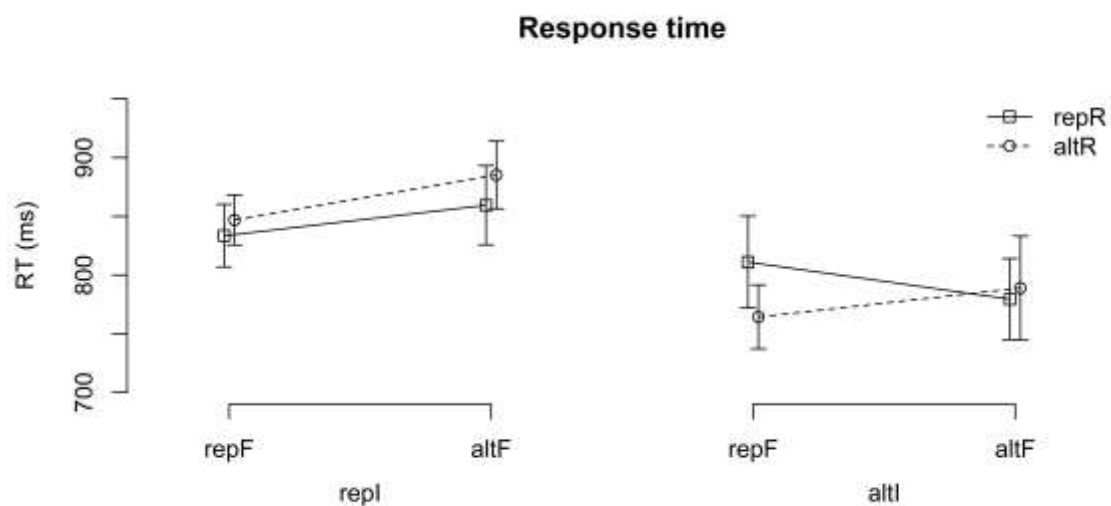


Abbildung 8: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 1b (Intervall). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 9: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=13 Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	M	SD
repF	repl	repR	833,60	96,18
repF	repl	altR	846,90	76,54
repF	atll	repR	811,10	141,00
repF	atll	altR	764,30	98,22
altF	repl	repR	859,50	121,70
altF	repl	altR	885,30	103,90
altF	atll	repR	779,50	124,70
altF	atll	altR	789,00	159,60

### 3.3 Experiment 2a (Finger)

**3.3.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 10) zeigte eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Reaktion und Intervall ( $F(1,8)=8,08$ ,  $p=0,022$ ). Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 11) konnte gezeigt werden, dass die Genauigkeit in *Binding*-kompatiblen im Vergleich zu *Binding*-inkompatiblen Bedingungen höher war. Wie bereits beschrieben ist diese signifikante Interaktion als Indiz für Stimulus-Reaktions-*Binding* zu deuten. Abbildung 9 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Die weiteren untersuchten Haupteffekte und Interaktionen erzielten keine Signifikanz.

Tabelle 10: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 2a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	$F(1,8)$	$p$	$p<0,05$
Reaktion	2,11	0,184	
Finger	0,00	0,981	
Intervall	0,10	0,760	
Reaktion x Finger	0,19	0,674	
Reaktion x Intervall	8,08	0,022	*
Finger x Intervall	0,85	0,385	
Reaktion x Finger x Intervall	1,29	0,290	

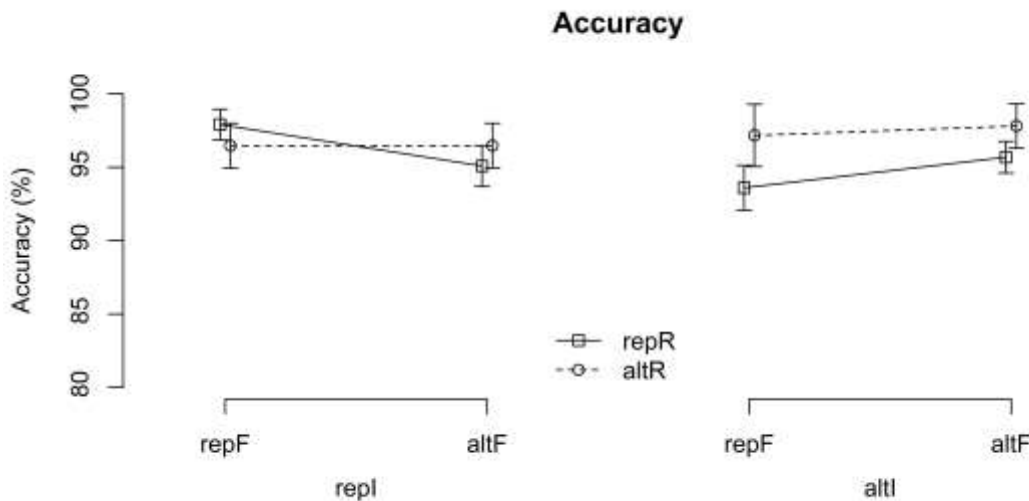


Abbildung 9: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 2a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 11: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent ( $M$ ) und der Standardabweichung ( $SD$ ) für die abhängige Variable Genauigkeit bei  $N=9$  Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	$M$	$SD$
repF	repl	repR	97,92	3,13
repF	repl	altR	96,48	4,57
repF	altl	repR	93,61	4,57
repF	altl	altR	97,18	6,37
altF	repl	repR	95,09	4,19
altF	repl	altR	96,48	4,57
altF	altl	repR	95,69	3,23
altF	altl	altR	97,82	4,53

**3.3.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 12) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für das Intervall ( $F(1,8)=23,95$ ,  $p=0,01$ ). Das bedeutet, dass der Faktor Intervall die Reaktionszeit signifikant beeinflusste, und zwar unabhängig davon, in welcher Ausprägung die anderen Faktoren vorlagen. Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 13) zeigt sich, dass die Reaktionszeit bei Bedingungen, in denen das Intervall alterniert (altl), höher ausfällt als bei Bedingungen, in denen sich das

Intervall wiederholt (repl). Abbildung 10 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Die weiteren untersuchten Haupteffekte und Interaktionen erzielten keine Signifikanz.

Tabelle 12: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 2a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	$F(1,8)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	1,29	0,290	
Finger	5,09	0,054	
Intervall	23,95	0,001	*
Reaktion x Finger	4,17	0,076	
Reaktion x Intervall	2,60	0,146	
Finger x Intervall	0,34	0,578	
Reaktion x Finger x Intervall	1,44	0,264	

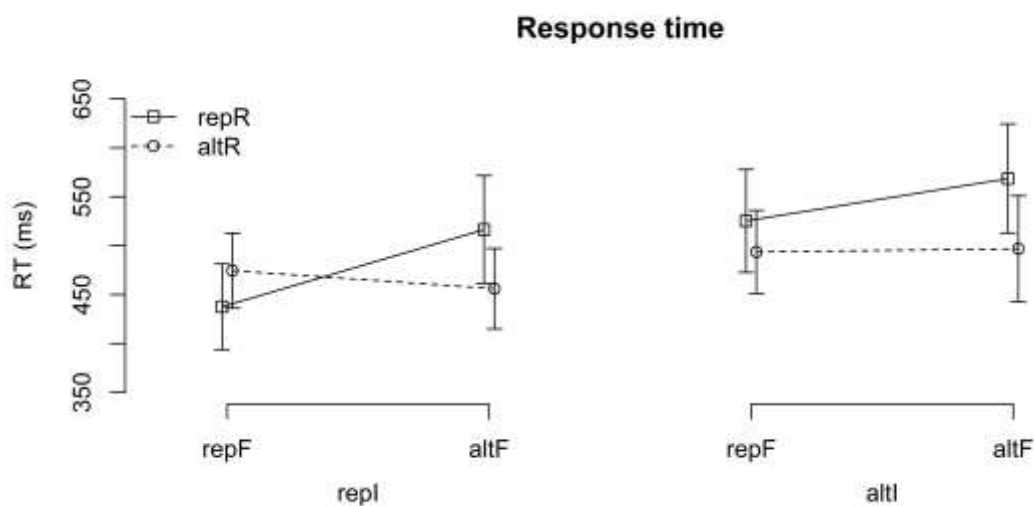


Abbildung 10: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 2a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=9 Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	M	SD
repF	repl	repR	437,70	131,40
repF	repl	altR	474,60	115,10
repF	atll	repR	525,40	157,70
repF	atll	altR	493,70	127,30
altF	repl	repR	516,50	165,60
altF	repl	altR	456,20	123,10
altF	atll	repR	568,70	167,00
altF	atll	altR	496,90	162,70

### 3.4 Experiment 2b (Intervall)

**3.4.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 14) zeigte keine signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen. Abbildung 11 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Tabelle 15 enthält die deskriptive Statistik.

Tabelle 14: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 2b (Intervall) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	F(1,7)	p	p<0,05
Reaktion	0,28	0,615	
Finger	3,86	0,090	
Intervall	0,00	0,981	
Reaktion x Finger	0,14	0,717	
Reaktion x Intervall	0,05	0,833	
Finger x Intervall	3,20	0,117	
Reaktion x Finger x Intervall	3,14	0,120	

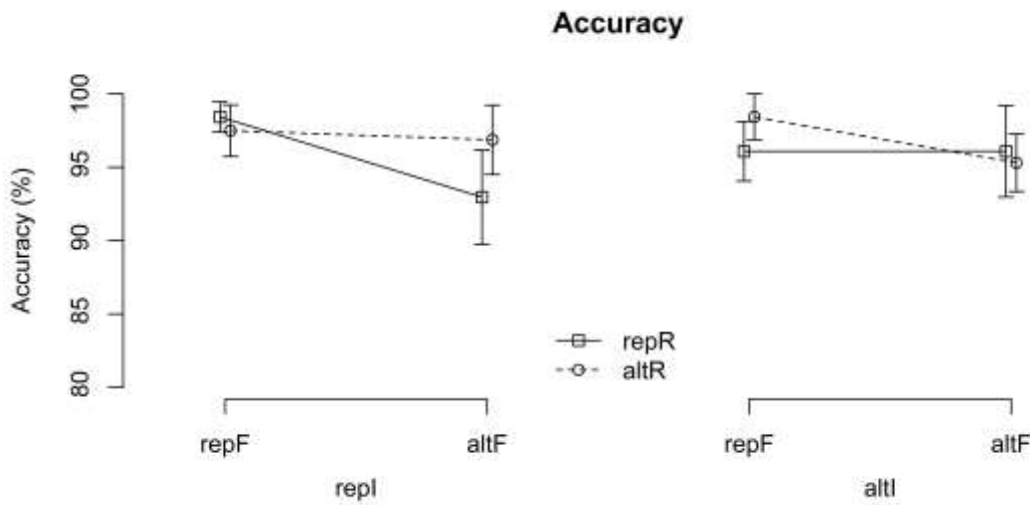


Abbildung 11: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 2b (Intervall). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 15: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent ( $M$ ) und der Standardabweichung ( $SD$ ) für die abhängige Variable Genauigkeit bei  $N=8$  Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	$M$	$SD$
repF	repl	repR	98,44	2,89
repF	repl	altR	97,50	4,96
repF	altl	repR	96,09	5,73
repF	altl	altR	98,44	4,42
altF	repl	repR	92,97	9,11
altF	repl	altR	96,88	6,68
altF	altl	repR	96,09	8,80
altF	altl	altR	95,31	5,54

**3.4.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 16) zeigte eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Reaktion und Intervall ( $F(1,7)=9,96$ ,  $p=0,016$ ). Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 17) konnte gezeigt werden, dass bei *Binding*-kompatiblen Bedingungen eine geringere Reaktionszeit vorlag im Vergleich zu *Binding*-inkompatiblen Bedingungen. Diese signifikante Interaktion deutet auf einen *Binding*-Effekt zwischen einem sensorischen Stimulusmerkmal (Intervall) und einem handlungsbezogenen Reaktionsmerkmal (Reaktion) hin. Abbildung 12 kann

eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Die weiteren untersuchten Haupteffekte und Interaktionen erzielten keine Signifikanz.

Tabelle 16: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 2b (Intervall) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	$F(1,7)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	5,54	0,051	
Finger	0,06	0,808	
Intervall	0,94	0,365	
Reaktion x Finger	1,24	0,302	
Reaktion x Intervall	9,96	0,016	*
Finger x Intervall	1,34	0,285	
Reaktion x Finger x Intervall	0,84	0,389	

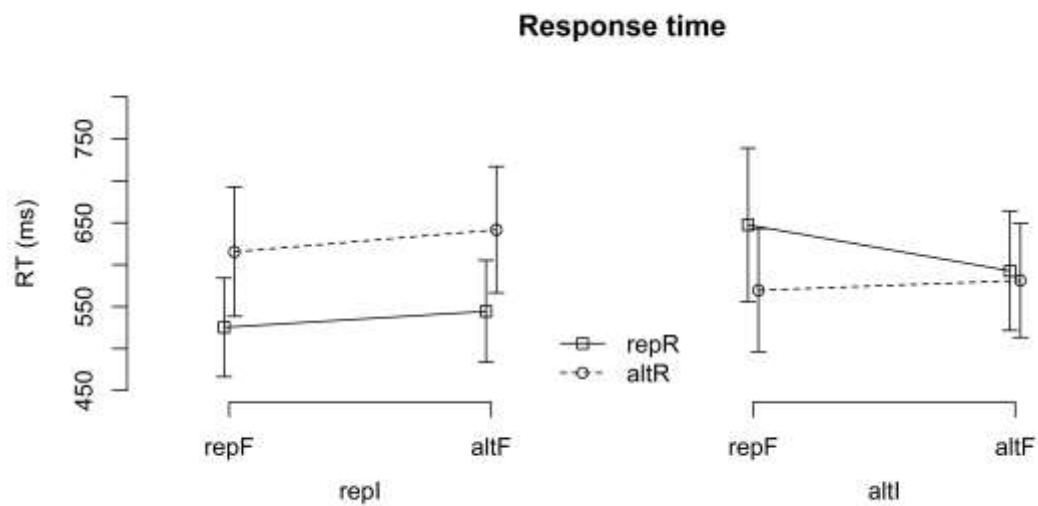


Abbildung 12: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Reaktion für Experiment 2b (Intervall). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 17: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=8 Probanden.

Finger	Intervall	Reaktion	M	SD
repF	repl	repR	525,20	166,60
repF	repl	altR	615,50	217,90
repF	atll	repR	647,50	259,00
repF	atll	altR	569,60	207,70
altF	repl	repR	544,40	171,90
altF	repl	altR	641,80	213,00
altF	atll	repR	592,80	201,00
altF	atll	altR	581,20	192,40

### 3.5 Experiment 4 (Finger)

**3.5.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 18) zeigte keine signifikanten Haupteffekte und keine signifikante Interaktion. Abbildung 13 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Tabelle 19 enthält die deskriptive Statistik.

Tabelle 18: Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA für Experiment 4 (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	F(1,12)	p	p<0,05
Reaktion	0,25	0,627	
Finger	0,07	0,798	
Reaktion x Finger	0,20	0,660	

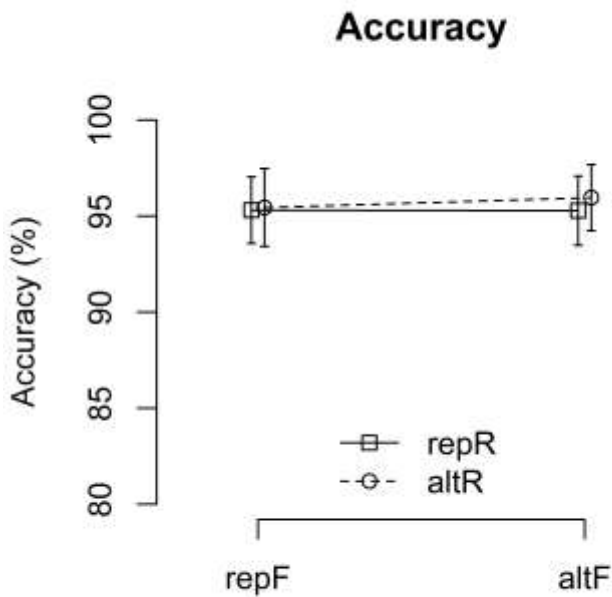


Abbildung 13: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der zwei Faktoren Finger und Reaktion für Experiment 4 (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 19: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent (*M*) und der Standardabweichung (*SD*) für die abhängige Variable Genauigkeit bei *N*=13 Probanden.

Reaktion	Finger	<i>M</i>	<i>SD</i>
repR	repF	95,31	6,25
repR	altF	95,28	6,50
altR	repF	95,45	7,31
altR	altF	95,96	6,21

**3.5.1 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 20) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Finger ( $F(1,12)=5,10, p=0,031$ ). Das bedeutet, dass der Faktor Finger die Reaktionszeit signifikant beeinflusste, und zwar unabhängig davon, in welcher Ausprägung die anderen Faktoren vorlagen. Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 21) zeigte sich, dass die Reaktionszeit bei Bedingungen, in denen der Finger alterniert (altF), höher ausfällt als bei Bedingungen, in denen sich der Finger wiederholt (repF). Abbildung 14 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden, welche diesen Befund stützt. Die weiteren

untersuchten Haupteffekte und die Interaktion erzielten keine Signifikanz.

Tabelle 20: Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA für Experiment 4 (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	$F(1,12)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	0,25	0,625	
Finger	5,10	0,031	*
Reaktion x Finger	0,21	0,656	

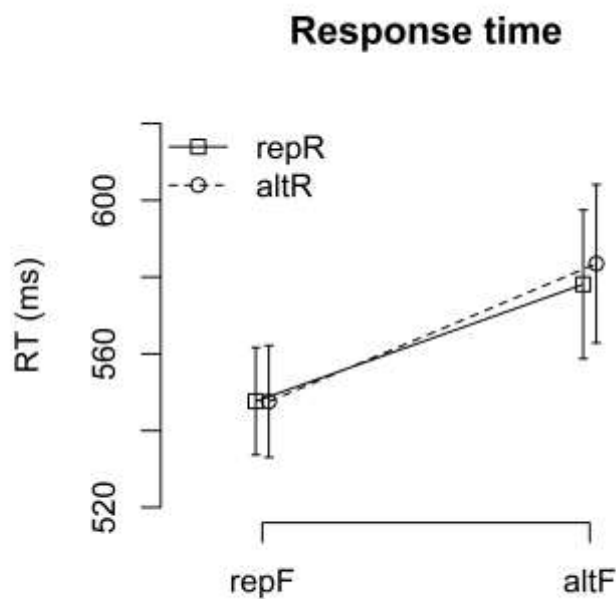


Abbildung 14: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der zwei Faktoren Finger und Reaktion für Experiment 4 (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 21: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=13 Probanden.

Reaktion	Finger	M	SD
repR	repF	547,70	50,48
repR	altF	578,20	69,86
altR	repF	547,60	52,54
altR	altF	583,50	74,41

### 3.6 Experiment 5a (Finger)

**3.6.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 22) zeigte erneut einen Haupteffekt für den Faktor Reaktion ( $F(1,19)=5,10$ ,  $p=0,036$ ). Wenn sich die Reaktion wiederholte (repR) war die Genauigkeit geringer als in Bedingungen, in denen die Reaktion alternierte (altR). Dies konnte deskriptiv anhand von Tabelle 23 als auch graphisch anhand von Abbildung 15 bestätigt werden.

Tabelle 22: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 5a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	$F(1,19)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	5,10	0,036	*
Finger	0,08	0,782	
Sequenz	0,11	0,741	
Reaktion x Finger	2,62	0,122	
Reaktion x Sequenz	0,02	0,898	
Finger x Sequenz	0,00	0,979	
Reaktion x Finger x Sequenz	1,69	0,209	

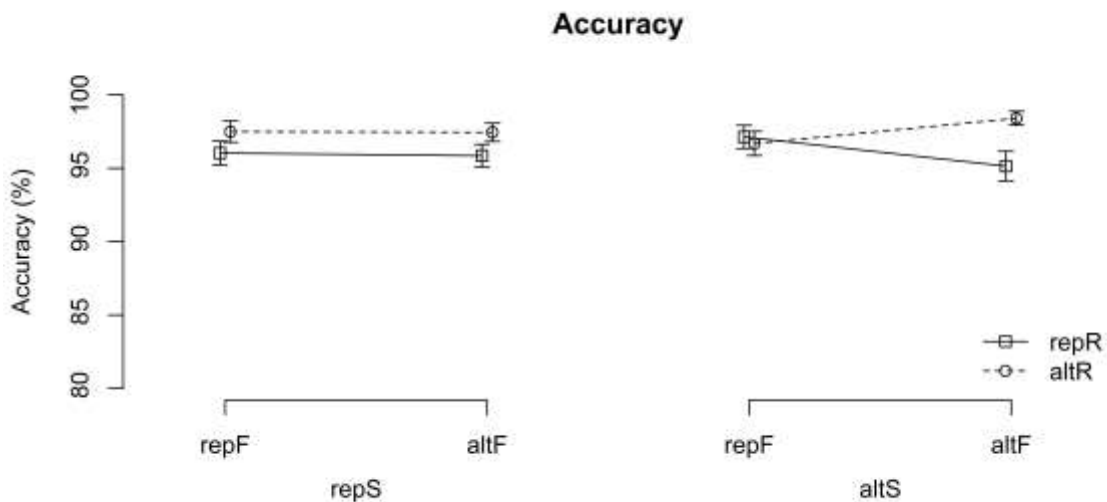


Abbildung 15: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 5a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 23: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Genauigkeit bei N=20 Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	M	SD
repF	repS	repR	96,05	5,32
repF	repS	altR	97,50	4,49
repF	altS	repR	97,14	3,29
repF	altS	altR	96,70	4,52
altF	repS	repR	95,86	4,36
altF	repS	altR	97,46	3,25
altF	altS	repR	95,16	4,91
altF	altS	altR	98,42	1,63

**3.6.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 24) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Reaktion ( $F(1,19)=5,23$ ,  $p=0,034$ ). Daraus lässt sich schließen, dass der Faktor Reaktion die Reaktionszeit, unabhängig von der Ausprägung der beiden anderen Faktoren, signifikant beeinflusste. Anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 25) zeigt sich, dass die Reaktionszeit bei Bedingungen, in denen sich die Reaktion wiederholt (repR) höher war als bei Bedingungen, in denen sich die Reaktion veränderte (altR). Dieser Befund spiegelt sich auch graphisch wider (Abbildung 16). Weiterhin zeigte sich in Experiment 5a (Finger) eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Reaktion und Finger ( $F(1,19)=15,03$ ,  $p=0,01$ ). Die Reaktionszeit fiel in *Binding*-kompatiblen Bedingungen kürzer aus als in *Binding*-inkompatiblen Bedingungen. Die anderen untersuchten Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant.

Tabelle 24: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 5a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	$F(1,19)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	5,23	0,034	*
Finger	0,37	0,552	
Sequenz	2,23	0,151	
Reaktion x Finger	15,03	0,001	*
Reaktion x Sequenz	0,01	0,928	
Finger x Sequenz	0,34	0,568	
Reaktion x Finger x Sequenz	0,36	0,557	

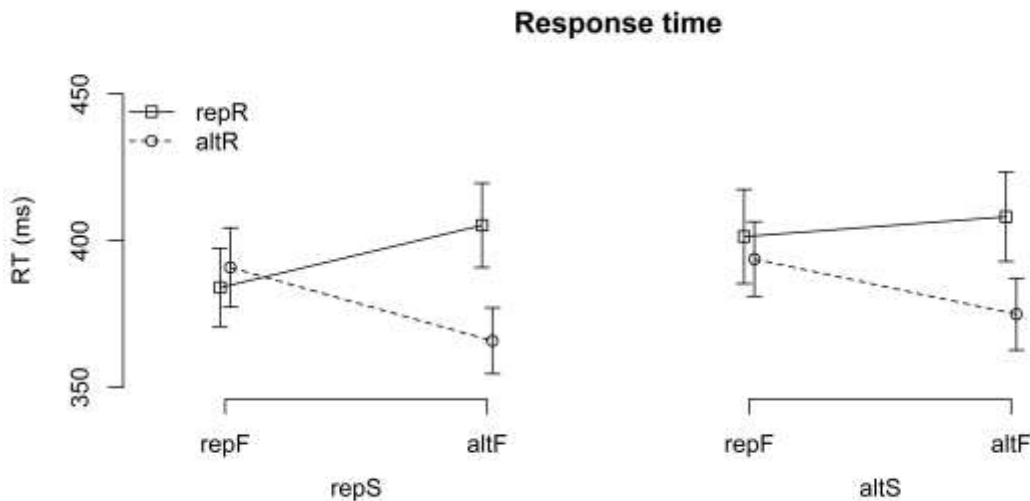


Abbildung 16: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Intervall und Sequenz für Experiment 5a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 25: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden ( $M$ ) und der Standardabweichung ( $SD$ ) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei  $N=20$  Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	$M$	$SD$
repF	repS	repR	384,10	104,10
repF	repS	altR	390,90	99,88
repF	altS	repR	401,40	120,10
repF	altS	altR	393,80	91,67
altF	repS	repR	405,30	118,30
altF	repS	altR	365,90	88,69
altF	altS	repR	408,20	111,00
altF	altS	altR	375,00	96,36

### 3.7 Experiment 5b (Sequenz)

**3.7.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 26) ergab eine signifikante Interaktion zwischen den beiden Stimulusmerkmalen Finger und Sequenz ( $F(1,9)=8,60$ ,  $p=0,017$ ). Bei Betrachtung der deskriptiven Statistik (Tabelle 27) wurde deutlich, dass die Genauigkeit geringer ausfiel, wenn sich die beiden Faktoren entweder vollständig wiederholten (repF repS) oder vollständig alternierten (altF altS) im Vergleich zu Bedingungen, in denen sich nur ein Faktor wiederholte (z.B. repF

altS). In Abbildung 17 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Die anderen untersuchten Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant.

Tabelle 26: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 5b (Sequenz) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	$F(1,9)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	1,62	0,236	
Finger	0,90	0,369	
Sequenz	4,59	0,061	
Reaktion x Finger	0,22	0,648	
Reaktion x Sequenz	1,47	0,256	
Finger x Sequenz	8,60	0,017	*
Reaktion x Finger x Sequenz	1,34	0,277	

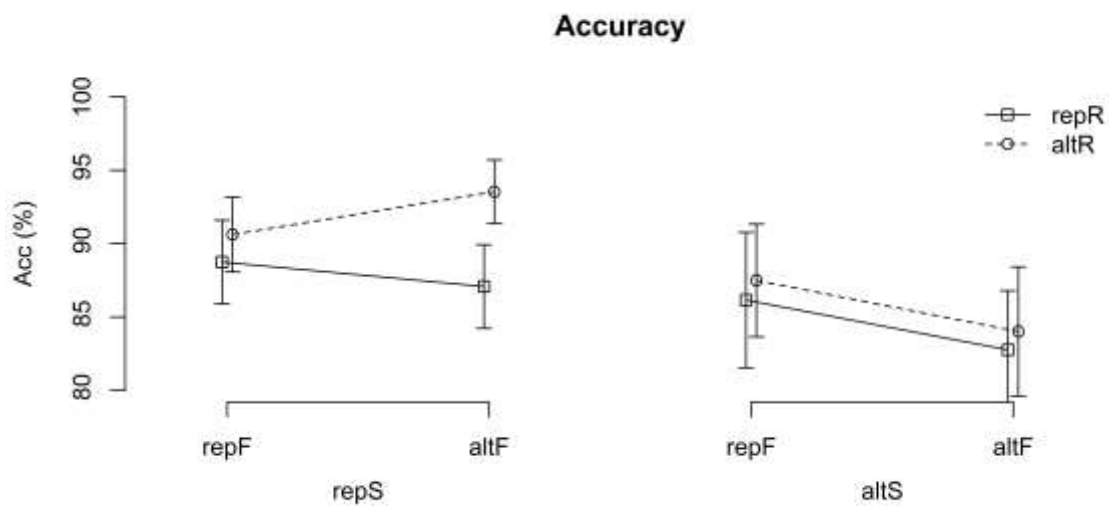


Abbildung 17: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 5b (Sequenz). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 27: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Genauigkeit bei N=10 Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	M	SD
repF	repS	repR	88,75	11,33
repF	repS	altR	90,62	10,31
repF	altS	repR	86,16	18,01
repF	altS	altR	87,50	15,02
altF	repS	repR	87,08	10,97
altF	repS	altR	93,54	8,18
altF	altS	repR	82,77	16,21
altF	altS	altR	84,02	16,81

**3.7.1 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 28) zeigte keine signifikanten Haupteffekte und keine signifikanten Interaktionen. Abbildung 18 kann eine graphische Darstellung der Ergebnisse entnommen werden. Tabelle 29 enthält die deskriptive Statistik.

Tabelle 28: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 5b (Sequenz) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	F(1,9)	p	p<0,05
Reaktion	1,77	0,216	
Finger	0,34	0,574	
Sequenz	0,04	0,846	
Reaktion x Finger	0,93	0,359	
Reaktion x Sequenz	4,94	0,053	
Finger x Sequenz	2,79	0,129	
Reaktion x Finger x Sequenz	0,40	0,541	

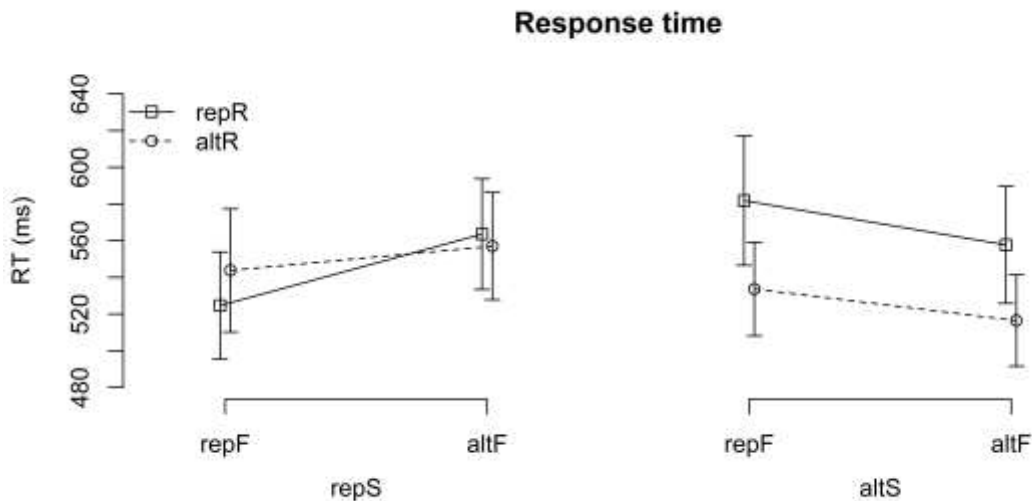


Abbildung 18: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 5b (Sequenz). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 29: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=10 Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	M	SD
repF	repS	repR	524,70	122,10
repF	repS	altR	543,80	131,40
repF	altS	repR	581,90	144,90
repF	altS	altR	533,70	88,34
altF	repS	repR	563,60	126,10
altF	repS	altR	557,00	122,40
altF	altS	repR	557,80	130,50
altF	altS	altR	516,50	97,52

### 3.8 Experiment 6a (Finger)

**3.8.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 30) zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Finger ( $F(1, 19)=4,37$ ,  $p=0,05$ ). Bei Betrachtung der deskriptiven Statistik (Tabelle 31) und der graphischen Analyse (Abbildung 19) ließ sich erkennen, dass die Genauigkeit höher war, wenn der Faktor Finger alternierte im Vergleich zu Versuchsbedingungen, in denen sich dieser Faktor wiederholte. Dies galt unabhängig

von der Ausprägung der anderen zwei Faktoren (Reaktion und Sequenz). Die anderen untersuchten Haupteffekte und Interaktionen waren statistisch nicht signifikant.

Tabelle 30: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 6a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	$F(1,19)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	1,41	0,249	
Finger	4,37	0,050	*
Sequenz	0,02	0,892	
Reaktion x Finger	2,74	0,114	
Reaktion x Sequenz	0,78	0,389	
Finger x Sequenz	0,08	0,784	
Reaktion x Finger x Sequenz	0,24	0,630	

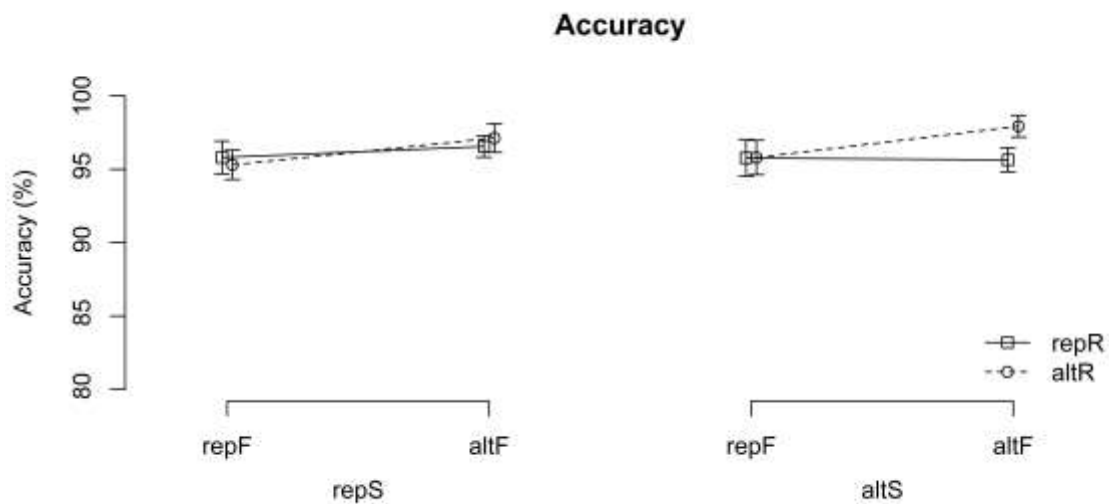


Abbildung 19: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 6a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 31: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent ( $M$ ) und der Standardabweichung ( $SD$ ) für die abhängige Variable Genauigkeit bei  $N=20$  Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	$M$	$SD$
repF	repS	repR	95,81	5,40
repF	repS	altR	95,31	4,48
repF	altS	repR	95,78	6,82
repF	altS	altR	95,81	5,90
altF	repS	repR	96,56	3,35
altF	repS	altR	97,14	5,46
altF	altS	repR	95,64	4,72
altF	altS	altR	97,94	4,08

**3.8.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die Auswertung der ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 32) ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Sequenz ( $F(1,19)=10,11$ ,  $p=0,005$ ). Hierbei wurde deutlich, dass die Reaktionszeit geringer war, wenn sich der Faktor Sequenz wiederholte (repS) im Vergleich zu Bedingungen, in denen der Faktor Sequenz alternierte (altS). Dies war unabhängig von der Ausprägung der anderen zwei Faktoren der Fall. Abgesehen davon zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Reaktion und Finger ( $F(1,19)=15,73$ ,  $p=0,001$ ). Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse anhand der deskriptiven Statistik (Tabelle 33) und der graphischen Analyse (Abbildung 20) zeigte sich, dass die Probanden in *Binding*-kompatiblen Bedingungen eine geringere Reaktionszeit aufwiesen als in *Binding*-inkompatiblen Bedingungen. Die beschriebene Interaktion ist dabei als Hinweis für einen *Binding*-Effekt zwischen Wahrnehmung und Handlung zu interpretieren. Alle weiteren Haupteffekte oder Interaktionen erreichten keine statistische Signifikanz.

Tabelle 32: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 6a (Finger) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	F(1,19)	p	p<0,05
Reaktion	0,05	0,818	
Finger	1,01	0,327	
Sequenz	10,11	0,005	*
Reaktion x Finger	15,73	0,001	*
Reaktion x Sequenz	0,13	0,723	
Finger x Sequenz	0,24	0,630	
Reaktion x Finger x Sequenz	0,75	0,397	

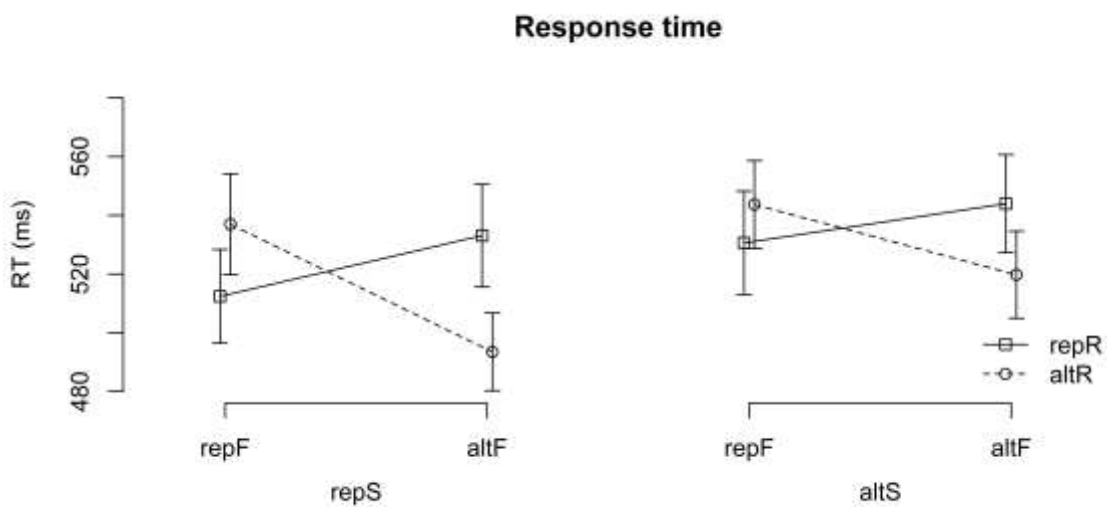


Abbildung 20: Reaktionszeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 6a (Finger). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 33: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=20 Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	M	SD
repF	repS	repR	512,40	110,70
repF	repS	altR	537,00	110,50
repF	altS	repR	530,70	130,70
repF	altS	altR	543,70	97,76
altF	repS	repR	533,10	124,60
altF	repS	altR	493,50	89,29
altF	altS	repR	544,00	117,20
altF	altS	altR	519,80	102,10

### 3.9 Experiment 6b (Sequenz)

**3.9.1 Abhängige Variable Genauigkeit.** Die ANOVA für die abhängige Variable Genauigkeit (Tabelle 34) ergab ebenfalls keine signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen. In Abbildung 21 werden die Ergebnisse graphisch dargestellt. Tabelle 35 ist die deskriptive Statistik zu entnehmen.

Tabelle 34: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA Experiment 6b (Sequenz) in Bezug auf die abhängige Variable Genauigkeit.

Effekt	$F(1,10)$	$p$	$p < 0,05$
Reaktion	4,21	0,067	
Finger	0,06	0,811	
Sequenz	0,47	0,507	
Reaktion x Finger	0,71	0,420	
Reaktion x Sequenz	1,10	0,318	
Finger x Sequenz	0,05	0,824	
Reaktion x Finger x Sequenz	0,11	0,746	

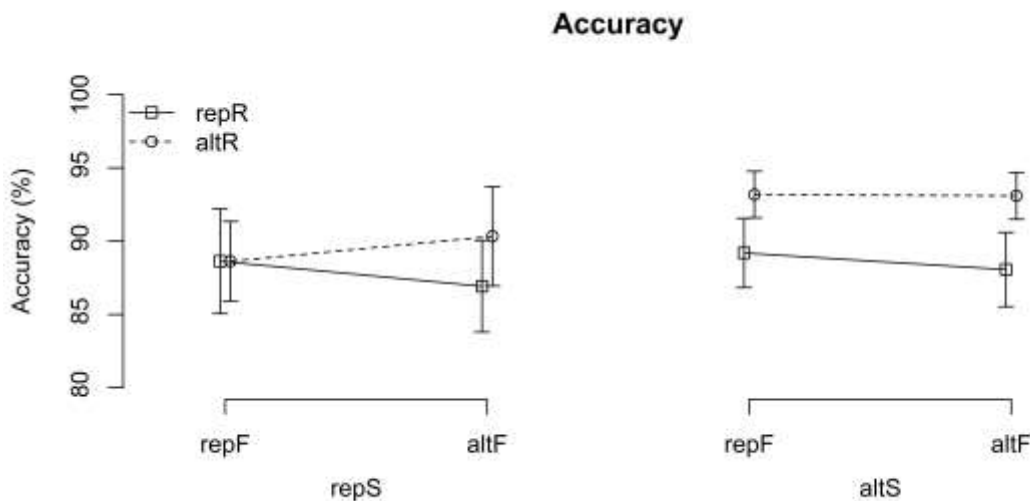


Abbildung 21: Genauigkeit in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 6b (Sequenz). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 35: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Genauigkeit in Prozent (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Genauigkeit bei N=11 Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	M	SD
repF	repS	repR	88,64	14,47
repF	repS	altR	88,64	10,76
repF	altS	repR	89,20	7,95
repF	altS	altR	93,18	4,38
altF	repS	repR	86,93	14,10
altF	repS	altR	90,34	13,80
altF	altS	repR	88,07	7,10
altF	altS	altR	93,10	6,61

**3.9.2 Abhängige Variable Reaktionszeit.** Die ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (Tabelle 36) ergab keine signifikanten Haupteffekte oder Interaktionen. In Abbildung 22 werden die Ergebnisse graphisch dargestellt. Tabelle 37 ist die deskriptive Statistik zu entnehmen.

Tabelle 36: Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA für Experiment 6b (Sequenz) in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit (logarithmiert).

Effekt	F(1,10)	p	p<0,05
Reaktion	1,03	0,333	
Finger	0,00	0,960	
Sequenz	0,64	0,444	
Reaktion x Finger	1,15	0,309	
Reaktion x Sequenz	0,06	0,812	
Finger x Sequenz	0,10	0,757	
Reaktion x Finger x Sequenz	2,07	0,181	

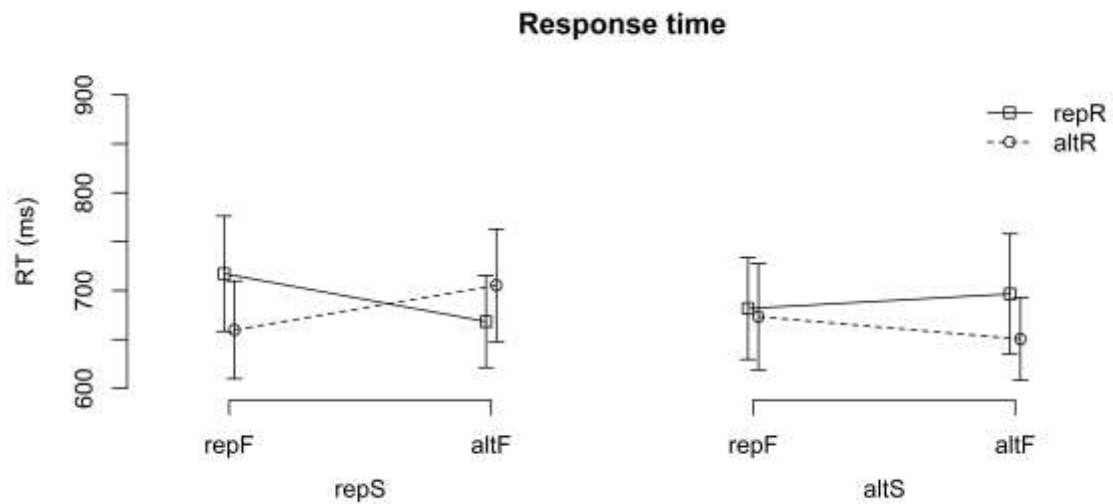


Abbildung 22: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Stufen der drei Faktoren Finger, Sequenz und Reaktion für Experiment 6b (Sequenz). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Tabelle 37: Deskriptive Statistik für die einzelnen Merkmalskombinationen mit dem Mittelwert der Reaktionszeit in Millisekunden (M) und der Standardabweichung (SD) für die abhängige Variable Reaktionszeit bei N=11 Probanden.

Finger	Sequenz	Reaktion	M	SD
repF	repS	repR	717,30	264,80
repF	repS	altR	659,90	227,40
repF	altS	repR	681,80	243,80
repF	altS	altR	673,40	247,00
altF	repS	repR	668,50	214,50
altF	repS	altR	705,40	259,70
altF	altS	repR	696,70	272,70
altF	altS	altR	650,60	192,90

## 4. Diskussion

Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, ausgehend vom visuellen S-R-Paradigma einen entsprechenden experimentellen Ansatz im somatosensorischen System zu etablieren und im Hinblick auf das Auftreten von S-R-*Binding* zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurden verschiedene Varianten des somatosensorisch-motorischen S-R-Experiments durchgeführt und miteinander verglichen. Dabei deuten Interaktionen zwischen sensorischen Stimulusmerkmalen (Intervall/Sequenz, Finger) und motorischen Reaktionsmerkmalen auf *Binding*-Phänomene hin, die wiederum für eine Kodierung im Sinne der TEC sprechen und somit auf einen gemeinsamen Integrationsmechanismus hindeuten. Da die TEC für das Verständnis neuropsychiatrischer Störungen, insbesondere für das Tourette-Syndrom, relevant ist, und bei dieser Erkrankung gleichsam der somatosensorischen Modalität eine bedeutende Rolle zukommt, ist es wichtig, experimentelle Paradigmen im somatosensorischen System zu entwickeln und zu untersuchen (Kleimaker et al., 2020). Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Experimente hinsichtlich des beobachteten *Bindings* zusammenfassend beschrieben.

### 4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Signifikante hypothesenkonforme Interaktionen, die auf *Binding* hindeuten, fanden sich in Bezug auf die abhängige Variable Reaktionszeit in Experiment 1a (Finger), Experiment 2b (Intervall), Experiment 5a (Finger) und Experiment 6a (Finger). Im Hinblick auf die abhängige Variable Genauigkeit wurden in Experiment 1a (Finger) und Experiment 2a (Finger) entsprechende signifikante Interaktionen zwischen Stimulus- und Reaktionsmerkmalen beobachtet. Tabelle 38 gibt einen Überblick über die Signifikanz der relevanten Interaktionen.

Tabelle 38: Zusammenfassung der signifikanten Interaktionen zwischen Stimulus- und Reaktionsmerkmalen über alle Experimente.

	Intervall/Sequenz x Reaktion	Intervall/Sequenz x Reaktion	Finger x Reaktion	Finger x Reaktion
	Reaktionszeit	Genauigkeit	Reaktionszeit	Genauigkeit
<b>1a</b> Finger- Aufgabe	x	x	✓	✓
<b>1b</b> Intervall- Aufgabe	x	x	x	X
<b>2a</b> Finger- Aufgabe	x	✓	x	X
<b>2b</b> Intervall- Aufgabe	✓	x	x	x
<b>4a</b> Finger- Aufgabe	-	-	x	x
<b>5a</b> Finger- Aufgabe	x	x	✓	x
<b>5b</b> Sequenz- Aufgabe	x	x	x	x
<b>6a</b> Finger- Aufgabe	x	x	✓	x
<b>6b</b> Sequenz- Aufgabe	x	x	x	x

- ✓ signifikante Interaktion
- x nicht signifikante Interaktion
- nicht vorhandene Stimulusmerkmale, keine Erhebung der gefragten Interaktionen

Tabelle 38 veranschaulicht, dass es Experiment-übergreifend teilweise zu signifikanten Interaktionen zwischen Stimulus- und Reaktionsmerkmalen kam. Zur weiteren Diskussion der Ergebnisse sei auf den folgenden Abschnitt verwiesen.

#### 4.2 Diskussion der Ergebnisse

In vorherigen Arbeiten konnte festgestellt werden, dass im visuellen System *Binding*-Effekte im Sinne der TEC auftreten (Colzato et al., 2006). In der vorliegenden Arbeit konnten auch für das somatosensorische System klare Hinweise auf *Bin-*

ding gefunden werden. So zeigte sich in einigen Experimenten, dass die Wechselwirkungen zwischen Stimulus- und Reaktionsmerkmalen Einfluss auf die Reaktionszeit bzw. die Genauigkeit haben. Unter welchen Bedingungen *Binding* im somatosensorischen System auftritt, kann durch die vorliegenden Experimente dahingegen nicht abschließend beurteilt werden. Einige Überlegungen zu dieser Thematik sollen im Folgenden dargestellt werden und als potentielle Erklärungsansätze dienen.

Zunächst ist hervorzuheben, dass *Binding* ausschließlich auftrat, wenn mindestens zwei Stimulusdimensionen (räumliche Dimension: Finger, zeitliche Dimension: Intervall/Sequenz) realisiert wurden. In Experiment 4, in dem nur eine Stimulusdimension, nämlich Finger, umgesetzt wurde, konnte kein *Binding* beobachtet werden. Dass im Falle von elektrotaktilen Stimuli mit nur einer Dimension keine *Binding*-Effekte induziert werden konnten, ist vermutlich auf die geringe Stimuluskomplexität zurückzuführen. Die TEC nimmt an, dass *Binding*-Effekte entstehen, wenn verschiedene Stimulusmerkmale an die gleiche Reaktion oder verschiedene Reaktionen an die gleichen Stimulusmerkmale gebunden sind. Diese partielle Übereinstimmung von den im *Event File* enthaltenen Merkmalen bringt einen Leistungsnachteil mit sich, der auf das Auflösen (*Unbinding*) des alten und die Neukonfiguration (*Rebinding*) des modifizierten *Event Files* zurückzuführen ist (Colzato et al., 2006; Kleimaker et al., 2020). Diese beschriebenen Prozesse sind potentiell sehr einfach und laufen schneller ab, wenn nur eine Stimulusdimension variiert wird. Dies könnte dem Fehlen von *Binding*-Effekten im Falle von nur einer realisierten Stimulusdimension zugrunde liegen.

Eine alternative Interpretation ist, dass die verschiedenen Finger nicht in einem gemeinsamen *Event File* repräsentiert werden, so dass keine Neukonfiguration erforderlich ist. Dies würde wiederum darauf hindeuten, dass die Repräsentation von Stimulusmerkmalen im Rahmen von *Binding*-Prozessen von funktionellen neuroanatomischen Unterschieden abhängig sind. Im somatosensorischen System werden der Daumen und der kleine Finger in verschiedenen kortikalen Regionen repräsentiert (Sutherling, Levesque, & Baumgartner, 1992). Daher ist es möglich, dass bei der Variation der Stimulusdimension Finger ohnehin ein neues *Event File* gebildet werden muss. Allerdings werden auch in der visuellen Modalität Stimulusmerkmale wie Orientierung, Farbe und räumliche Position an verschiedenen

funktionellen neuroanatomischen Orten repräsentiert. Dennoch konnten hier mehrfach robuste *Binding*-Effekte nachgewiesen werden (Kleimaker et al., 2020). Dies macht es unwahrscheinlich, dass der Effekt auf Unterschiede in der Repräsentation von Merkmalen auf einer funktionellen neuroanatomischen Ebene zurückzuführen ist. Dies wird auch durch neurophysiologische Befunde erhärtet, laut denen *Event Files* in verteilter netzwerkartiger Aktivität organisiert sind (Kikumoto & Mayr, 2020; Takacs et al., 2020). Insgesamt erscheint es somit plausibler, dass *Binding*-Effekte eher von der Anzahl realisierter Stimulusdimensionen abhängen.

Zudem kam es beinahe ausschließlich, das heißt in fünf von sechs der beobachteten signifikanten Interaktionen, zu *Binding* zwischen der Reaktion und der jeweils R2-relevanten Stimulusdimension. Dies stellt eine Parallele zu den Experimenten im visuellen System dar (Colzato et al., 2006). Auf der anderen Seite führt R2-Relevanz nicht automatisch zu *Binding*-Effekten, wie anhand von Tabelle 38 zu erkennen ist.

Darüber hinaus zeigten sich signifikante Interaktionen vor allem in Bezug auf das Stimulusmerkmal Finger. Deutlich seltener, das heißt in lediglich zwei der sechs relevanten Interaktionen, wurden signifikante Effekte beim Stimulusmerkmal Intervall bzw. Sequenz beobachtet. Zu signifikantem Reaktion x Finger-*Binding* kam es, wie zuvor angeführt, jedoch auch nur, wenn die antwortrelevante Stimulusdimension der Finger war und wenn der Merkmalsraum mindestens zwei Dimensionen enthielt.

Ein weiterer Grund dafür, dass nur in manchen Experimenten *Binding*-Effekte zu beobachten waren, könnte das gewählte zeitliche Intervall zwischen Stimulus und Reaktion sein. Um ein *Event File* zu bilden, müssen sowohl Stimulus- als auch Reaktionsmerkmale gemeinsam integriert werden. Dies ist möglicherweise nur in einem begrenzten zeitlichen Rahmen möglich. Es ist folglich in Erwägung zu ziehen, dass das gewählte Intervall zwischen somatosensorischem Stimulus und Reaktion zu lang war, um ein solches *Event File* zu bilden. Auf der anderen Seite scheinen *Binding*-Effekte im visuellen System durchaus über einen längeren Zeitraum, nämlich bis zu 4000ms, zu überdauern (Hommel & Colzato, 2004). Die in den vorgestellten Experimenten gewählten Intervalle zwischen Stimulus und Reaktion waren dabei durchgängig länger als dieser Grenzwert. Nichtsdestotrotz ist nicht auszuschließen, dass das zeitliche Integrationsfenster im somatosensorischen System

im Vergleich zum visuellen System anders ausfällt. Vor allem bei den Stimuli mit einem langen Intervall (Experimente 1a, 1b sowie 2a, 2b) könnte dies problematisch gewesen sein, was sich in dem Umstand widerspiegelt, dass die Probanden teilweise bereits nach dem ersten Reiz und damit während des Stimulus reagierten. Es ist möglich, dass die Probanden nicht beide Reize gemeinsam als einen Stimulus wahrgenommen und integriert, sondern diese sukzessive und getrennt voneinander verarbeitet haben. Dies könnte wiederum die Bildung von *Event Files* beeinflusst und infolgedessen auch das Entstehen von *Binding*-Effekten beeinträchtigt haben. Das Fehlen von *Binding*-Effekten bei zeitlich getrennten Stimuli legt nahe, dass *Binding* nur dann auftritt, wenn ein gegebener Stimulus als eine Einheit wahrgenommen und die entsprechende Reaktion gleichzeitig oder innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters verarbeitet wird (Hommel, 1998, 2004; Hommel et al., 2001). Somit scheint *Binding* im somatosensorischen System möglicherweise besonders zeitempfindlich zu sein. Durch die Einführung der Merkmalsdimension Sequenz konnte diesem Umstand begegnet werden, da die Probanden hier den Stimulus trotz einer mehrfachen Stimulation subjektiv als Ganzes wahrnahmen. Gleichzeitig konnte auf diese Weise der Merkmalsraum erweitert werden, was sich, wie bereits erläutert, auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse ebenfalls begünstigend auf das Auftreten von *Binding*-Effekten auswirkt.

Obwohl *Binding* ein automatischer Prozess ist, der nicht per se Aufmerksamkeit erfordert (Hommel, 2005), ist bekannt, dass dieser Prozess von Aufmerksamkeitsprozessen beeinflusst wird (Hommel, 2009; Petruo et al., 2016). Demnach könnte die Stimulus 1 (S1) gewidmete Aufmerksamkeit Einfluss auf *Binding*-Phänomene haben. Dieser Faktor wurde in den vorliegenden Experimenten durch die Etablierung einer Abschlussfrage am Ende eines *Trials*, in der nach bestimmten Merkmalen von S1 gefragt wurde, variiert. In den Experimenten, die in der *Voluntary*-Version durchgeführt wurden, wurde eine Abschlussfrage gestellt, wohingegen die Abschlussfrage in den Experimenten in der *Automatic*-Version fehlte. Die Etablierung einer Abschlussfrage könnte dabei theoretisch zweierlei Konsequenzen nach sich ziehen. Auf der einen Seite könnte die Bildung von *Event Files* durch die Aufmerksamkeitslenkung auf S1 erleichtert werden. Dies liegt darin begründet, dass für die Bildung des *Event Files* neben den Reaktionsmerkmalen von R1 auch die Stimulusmerkmale von S1 integriert werden müssen, was möglicherweise leichter fällt, wenn die Aufmerksamkeit auf diese Merkmale gerichtet ist

(Hommel, 2005). Wenn ein *Event File* gebildet wird, sollte sich dies auch in *Binding*-Effekten niedergeschlagen. Auf der anderen Seite ließe sich auch vermuten, dass die Integration von Merkmalen im Falle einer schwierigeren Aufgabenstellung behindert wird. Infolgedessen müsste die Etablierung eines *Event Files* durch die Abschlussfrage erschwert sein, was *Binding*-Effekte untergraben würde. In Bezug auf das untersuchte experimentelle Paradigma ist es somit von Interesse, Experimente in der *Voluntary*-Version (mit Abschlussfrage) und Experimente in der *Automatic*-Version (ohne Abschlussfrage) miteinander zu vergleichen.

In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass es zum Beispiel in Experiment 1a (Finger), welches in der *Voluntary*-Version (mit Abschlussfrage) durchgeführt wurde, zu einer signifikanten Interaktion zwischen dem Stimulusmerkmal Finger und der Reaktion kam. In Experiment 2a (Finger), welches in der *Automatic*-Version durchgeführt wurde, kam es dagegen nicht zu einer signifikanten Interaktion zwischen Stimulus- und Reaktionsmerkmalen. Hieran wird deutlich, dass durch das Hinzufügen einer Abschlussfrage *Binding* offenbar begünstigt wurde. Einwendend ist jedoch zu betonen, dass insbesondere in den Experimenten 1 bis 4 nur eine geringe Anzahl an Versuchspersonen teilnahm, was die inhaltliche Interpretation von nicht signifikanten Ergebnissen erschwert.

Zusammenfassend zeigte sich, dass sowohl in den Experimenten mit Abschlussfrage (*Voluntary*-Version: 1a, 1b, 6a, 6b) als auch in den Experimenten ohne Abschlussfrage (*Automatic*-Version: 2a, 2b, 4a, 5a, 5b) teilweise *Binding*-Effekte zu beobachten waren. Somit ist weiterhin unklar, ob die Erhöhung der Aufmerksamkeit auf S1 begünstigende oder beeinträchtigende Auswirkungen auf *Binding*-Effekte im somatosensorischen System hat, sodass es weiterer Forschung bedarf, um diese Frage zu beantworten.

### 4.3 Stärken und Limitationen

Die vorliegende Studie zeichnete sich vor allem durch ihr elaboriertes Design aus, das das Ziel verfolgte, *Binding*-Effekte zuverlässig nachzuweisen und gleichsam eine möglichst hohe Ähnlichkeit zu Studien im visuellen System zu erreichen.

Durch die Versuchsanordnung, die in den verschiedenen Experimenten modifiziert und angepasst wurde, konnten diese Ziele teilweise erreicht werden.

Trotz der Ähnlichkeiten der Experimente im visuellen System und der hier vorliegenden Experimente im somatosensorischen System muss eingewendet werden,

dass grundlegende Unterschiede zwischen den beiden Modalitäten und somit auch zwischen den Experimenten existieren. Bei den Experimenten in der visuellen Domäne war ein Stimulus durch die Dimensionen Form, Farbe und Position definiert. In der somatosensorischen Domäne ließen sich lediglich zwei Dimensionen, nämlich die räumliche Dimension (Daumen oder kleiner Finger) und die zeitliche Dimension (langes oder kurzes Intervall bzw. zweifache oder mehrfache Sequenz), umsetzen. Somit ergibt sich zwischen den beiden Experimenten zwangsläufig ein quantitativer Unterschied hinsichtlich der realisierten Stimulusdimensionen. Die Etablierung einer dritten Stimulusdimension im somatosensorischen System wäre wünschenswert, um die Ähnlichkeit zu Experimenten in der visuellen Domäne möglichst zu maximieren und *Binding*-Phänomene im somatosensorischen Bereich zu untersuchen. Dies ist jedoch wenig praktikabel, sofern man sich auf elektrische Reize als Stimulusmaterial beschränkt. Beispielsweise scheint eine Modifikation der Intensität des Reizes (z.B. Unterscheidung zwischen schwachen und starken Stromreizen) aufgrund der potentiellen Schmerzhaftigkeit des Stimulus nicht tragbar. Die Schaffung weiterer experimenteller Stimulusdimensionen im somatosensorischen System, möglicherweise unter Verwendung einer anderen Reizart, könnte in weiteren Forschungsarbeiten berücksichtigt werden. Abgesehen von den beschriebenen quantitativen Unterschieden der Stimulusdimensionen im visuellen und somatosensorischen Bereich liegen auch qualitative Unterschiede vor. So unterscheidet sich beispielsweise das somatosensorische Merkmal Intervall bzw. Sequenz grundlegend von visuellen Reizmerkmalen wie etwa der Farbe, da sich dieses Merkmal auch durch eine zeitlich-rhythmische Komponente definiert. Weiterhin lässt sich vermuten, dass Menschen generell eine größere Vertrautheit mit den in Experimenten verwendeten visuellen Stimuli haben. Ein elektrischer Reiz am Finger ist weniger alltagsnah, was das Antwortverhalten im Kontrast zu vergleichbaren visuellen Experimenten beeinflussen könnte.

Eine Stärke der Studie stellt die standardisierte Durchführung und Auswertung des Versuches dar, was eine hohe interne Validität gewährleistete. Hierbei lässt sich insbesondere die Anpassung der Stromstärke an die individuelle Sensibilität der einzelnen Probanden hervorheben. Auf diese Weise konnte ausgeschlossen werden, dass Unterschiede in der individuellen Empfindlichkeit die Ergebnisse beeinflusst haben. Auf der anderen Seite lässt sich die eingeschränkte externe Validität der Studie bemängeln. In den vorgestellten Experimenten waren die Probanden

dazu angehalten, einfache Bewegungen, wie etwa das Drücken einer Taste auf einer Tastatur, durchzuführen, die keinen spezifischen Zweck erfüllten. In der Realität werden im Gegensatz dazu vor allem zielgerichtete und komplexe Handbewegungen durchgeführt, die sich im Labor in dieser Form kaum realisieren lassen. Infolgedessen ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf reale Bedingungen möglicherweise eingeschränkt. Dieses Problem tritt allerdings auch bei visuellen Paradigmen auf und stellt somit eine generelle Limitation von sensorischen S-R-Experimenten dar. Eine weitere Einschränkung der Übertragbarkeit könnte sich darüber hinaus aus der Verwendung einer studentischen Stichprobe ergeben haben, da diese hinsichtlich Alter und Bildungsniveau nicht dem allgemeinen Bevölkerungsdurchschnitt entspricht.

Schließlich ist anzumerken, dass einige Versuchsteilnehmer die hohe Aufgabenschwierigkeit sowie die hohen Anforderungen der Experimente an die Konzentrationsfähigkeit bemängelten. Dieser subjektive Eindruck schlug sich entsprechend in der Leistung der Versuchsteilnehmer in Form hoher Fehlerraten oder Antwortlatenzen nieder, was zum Ausschluss einiger Probanden führte. Eine weitere methodische Limitation betrifft somit die zum Teil kleine Anzahl an Versuchspersonen, was mit einer eher geringen statistischen Power in den entsprechenden Experimenten einhergeht. Folglich können statistisch kleine Effekte nicht erkannt werden. Letztlich kann bei einer geringen Probandenanzahl im Falle von nicht signifikanten Interaktionen keine inhaltliche Aussage über die Existenz von *Binding*-Effekten getroffen werden. Für nachfolgende Studien erscheint es somit einerseits plausibel, eine größere Stichprobe zu verwenden und andererseits die Schwierigkeit der Aufgabenstellung zu reduzieren. Die subjektiv als zu hoch empfundenen Anforderungen an die Konzentrationsfähigkeit könnten beispielsweise durch eine kürzere Dauer des Experiments reduziert werden. Allerdings würde dies aufgrund der geringeren Anzahl an *Trial*s wiederum den Nachteil von ungenaueren Schätzungen mit sich bringen. Zusammenfassend sollte daher in zukünftigen Forschungsarbeiten eine sorgfältige Abwägung hinsichtlich der Versuchspersonen- und *Trial*-Anzahl auf der einen Seite sowie den kognitiven Kapazitäten der Probanden auf der anderen Seite erfolgen.

#### 4.4 Fazit

Zusammenfassend konnten in den vorliegenden Experimenten deutliche Hinweise auf *Binding*-Effekte im somatosensorischen System nachgewiesen werden. Wenngleich die genauen Bedingungen für *Binding* in weiteren Forschungsarbeiten noch weiter spezifiziert werden sollten, konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit bereits einige Erkenntnisse gewonnen werden. So zeigte sich, dass *Binding*-Effekte nur bei einem komplexen Merkmalsraum hinsichtlich der verwendeten Stimuli auftreten. Es müssen mindestens zwei Stimulusdimensionen (z.B. Intervall bzw. Sequenz, zusätzlich zu Finger) variiert werden, um *Binding* zu induzieren. Zudem traten vor allem bei R2-relevanten Stimulusdimensionen signifikante Interaktionen zwischen wahrnehmungs- und handlungsbezogenen Merkmalen auf. Hier konnte überwiegend Reaktion x Finger-*Binding* verzeichnet werden. Weiterhin deuten die vorliegenden Ergebnisse darauf hin, dass die Prozesse zur Bildung von *Event Files* und somit die Kopplung von Merkmalen zeitempfindlich sind. Als Voraussetzung für *Binding* muss der Stimulus vermutlich als eine Einheit wahrgenommen und in einem kurzen Zeitfenster gemeinsam mit der dazugehörigen Reaktion integriert verarbeitet werden. Schließlich konnte gezeigt werden, dass Aufmerksamkeitsprozesse *Binding* beeinflussen. Hier bedarf es jedoch weiterer Forschung, um diese Beeinflussung genauer zu determinieren.

Die gefundenen Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den Experimenten im visuellen und somatosensorischen System könnten durch die Unterschiede in der Quantität und Qualität der realisierten Stimulusmerkmale begründet liegen. Folglich kann nicht geschlussfolgert werden, dass *Binding* im somatosensorischen System grundlegend anders funktioniert als im visuellen System. Insgesamt scheint die TEC auf Basis der beschriebenen Ergebnisse auch für das somatosensorische System Gültigkeit zu besitzen, was für das Verständnis neuropsychiatrischer Störungen, insbesondere für das Tourette-Syndrom, dienlich sein kann.

### Literaturverzeichnis

- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5<sup>th</sup> ed.). Washington, DC: Author.
- Beste, C., & Münchau, A. (2018). Tics and Tourette syndrome—Surplus of actions rather than disorder? *Movement Disorders*, *33*(2), 238–242.
- Bloch, M. H., & Leckman, J. F. (2009). Clinical course of Tourette syndrome. *Journal of Psychosomatic Research*, *67*(6), 497–501.
- Buse, J., Schoenefeld, K., Münchau, A., & Roessner, V. (2013). Neuromodulation in Tourette syndrome: Dopamine and beyond. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(6), 1069–1084.
- Chen, J. J., Ondo, W. G., Dashtipour, K., & Swope, D. M. (2012). Tetrabenazine for the treatment of hyperkinetic movement disorders: A review of the literature. *Clinical Therapeutics*, *34*(7), 1487–1504.
- Colzato, L. S. (2005). *Commonalities of feature integration processing in and across perception and action planning*. Dept. of Cognitive Psychology, Faculty of Social and Behavioural Sciences, Leiden University.
- Colzato, L. S., Warrens, M. J., & Hommel, B. (2006). Priming and binding in and across perception and action: A correlational analysis of the internal structure of event files. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*(10), 1785–1804.
- Conelea, C. A., Woods, D. W., Zinner, S. H., Budman, C. L., Murphy, T. K., Scahill, L. D., Compton, S. N., & Walkup, J. T. (2013). The impact of Tourette syndrome in adults: Results from the Tourette syndrome impact survey. *Community Mental Health Journal*, *49*(1), 110–120.
- Hallett, M. (2015). Tourette Syndrome: Update. *Brain & Development*, *37*(7), 651–655. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2014.11.005>
- Herrmann, K., Sprenger, A., Baumung, L., Alvarez-Fischer, D., Muenchau, A., & Brandt, V. (2019). Help or hurt? How attention modulates tics under different conditions. *Cortex*, *120*, 471–482.
- Hommel, B. (1998). Event files: Evidence for automatic integration of stimulus-response episodes. *Visual Cognition*, *5*(1–2), 183–216.
- Hommel, B. (2004). Event files: Feature binding in and across perception and action. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(11), 494–500.
- Hommel, B. (2005). How much attention does an event file need? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(5), 1067.
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research PRPF*, *73*(4), 512–526.
- Hommel, B., & Colzato, L. (2004). Visual attention and the temporal dynamics of feature integration. *Visual Cognition*, *11*(4), 483–521.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). Codes and their vicissitudes. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(5), 910–926.

- Kahneman, D., Treisman, A., & Gibbs, B. J. (1992). The reviewing of object files: Object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, 24(2), 175–219.
- Kalanithi, P. S., Zheng, W., Kataoka, Y., DiFiglia, M., Grantz, H., Saper, C. B., Schwartz, M. L., Leckman, J. F., & Vaccarino, F. M. (2005). Altered parvalbumin-positive neuron distribution in basal ganglia of individuals with Tourette syndrome. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(37), 13307–13312.
- Kikumoto, A., & Mayr, U. (2020). Conjunctive representations that integrate stimuli, responses, and rules are critical for action selection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(19), 10603–10608.
- Kleimaker, M., Takacs, A., Conte, G., Onken, R., Verrel, J., Bäumer, T., Münchau, A., & Beste, C. (2020). Increased perception-action binding in Tourette syndrome. *Brain*, 143(6), 1934–1945.
- Kwak, C., Dat Vuong, K., & Jankovic, J. (2003). Premonitory sensory phenomenon in Tourette's syndrome. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 18(12), 1530–1533.
- Leek, M. R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1279–1292.
- Müller-Vahl, K. (2007). Die Benzamide Tiaprid, Sulpirid und Amisulprid in der Therapie des Tourette-Syndroms. *Der Nervenarzt*, 78(3), 264–271.
- Müller-Vahl, K., Dodel, I., Müller, N., Münchau, A., Reese, J. P., Balzer-Geldsetzer, M., Dodel, R., & Oertel, W. H. (2010). Health-related quality of life in patients with Gilles de la Tourette's syndrome. *Movement Disorders*, 25(3), 309–314.
- Nagy, A., Eördegh, G., Paróczy, Z., Márkus, Z., & Benedek, G. (2006). Multisensory integration in the basal ganglia. *European Journal of Neuroscience*, 24(3), 917–924.
- Paszek, J., Pollok, B., Biermann-Ruben, K., Müller-Vahl, K., Roessner, V., Thomalla, G., Robertson, M. M., Orth, M., Schnitzler, A., & Münchau, A. (2010). Is it a tic?—Twenty seconds to make a diagnosis. *Movement Disorders*, 25(8), 1106–1108.
- Petruo, V. A., Stock, A.-K., Münchau, A., & Beste, C. (2016). A systems neurophysiology approach to voluntary event coding. *NeuroImage*, 135, 324–332.
- Petruo, V., Bodmer, B., Brandt, V. C., Baumung, L., Roessner, V., Münchau, A., & Beste, C. (2019). Altered perception-action binding modulates inhibitory control in Gilles de la Tourette syndrome. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(9), 953–962.
- Riederer, F., Stamenkovic, M., Schindler, S., & Kasper, S. (2002). Das Tourette-Syndrom Eine Übersicht. *Der Nervenarzt*, 73(9), 805–819.
- Riedwyl, H. (1997). *Lineare Regression und Verwandtes: Beispiele mit Lösungsvorschlägen*. Springer-Verlag.
- Robertson, M. M. (2012). The Gilles de la Tourette syndrome: The current status. *Archives of Disease in Childhood-Education and Practice*, 97(5), 166–175.
- Shaw, Z. A., & Coffey, B. J. (2014). Tics and Tourette syndrome. *Psychiatric Clinics*, 37(3), 269–286.
- Stern, E., Silbersweig, D. A., Chee, K.-Y., Holmes, A., Robertson, M. M., Trimble, M., Frith, C. D., Frackowiak, R. S., & Dolan, R. J. (2000). A functional neuroanatomy

- of tics in Tourette syndrome. *Archives of General Psychiatry*, 57(8), 741–748.
- Stoet, G., & Hommel, B. (1999). Action planning and the temporal binding of response codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(6), 1625.
- Sutherling, W. W., Levesque, M. F., & Baumgartner, C. (1992). Cortical sensory representation of the human hand: Size of finger regions and nonoverlapping digit somatotopy. *Neurology*, 42(5), 1020–1020.
- Takacs, A., Zink, N., Wolff, N., Münchau, A., Mückschel, M., & Beste, C. (2020). Connecting EEG signal decomposition and response selection processes using the theory of event coding framework. *Human Brain Mapping*, 41(10), 2862-2877.
- Termine, C., Selvini, C., Rossi, G., & Balottin, U. (2013). Emerging treatment strategies in Tourette syndrome: What's in the pipeline? *International review of neurobiology*, 112, 445–480.

## Anhang

### Anhang A1: Studieninformation und Einwilligungserklärung



#### Teilnahmeinformation zur Studie: „Beschreibung des Event-File-Coding im somatosensorisch-motorischen System“

##### Studienziel

Es handelt sich um eine Pilot-Studie zur Vorbereitung zukünftiger Studien zur somatosensorisch-motorischen Integration bei Patienten mit Tourette-Syndrom. Das Tourette-Syndrom ist hauptsächlich durch das Auftreten plötzlicher, sich wiederholender Bewegungen und Laute („Tics“) gekennzeichnet. Eine Ursache für diese Tics könnte darin liegen, dass das Gehirn bei Personen mit Tourette-Syndrom motorische Handlung und taktile Wahrnehmung anders verarbeitet und ansteuert als Gehirne von Personen, die keine Tics haben.

##### Überblick über den Ablauf der Studie

Die Studie beinhaltet einen Termin am UKSH in Lübeck, der etwa **eine Stunde** dauert. Zu Beginn der Sitzung ist Gelegenheit offene Fragen zu klären. Im Anschluss daran führen Sie eine Reaktionsaufgabe am Computer aus, bei der man nach bestimmten Regeln auf taktile Reize reagieren soll, die per elektrischer Stimulation der rechten und linken Hand dargeboten werden. Hierbei wird die Versuchsperson elektrischen Reizen an den Händen (jeweils Elektroden an Daumen, Kleinfinger der dominanten Hand sowie Handrücken beidseits) ausgesetzt, wobei die elektrischen Reize unterhalb der Schmerzschwelle liegen. Die Intensität der Stimulation wird vor Beginn des Experiments individuell festgelegt.

##### Zeitaufwand und Aufwandsentschädigung

Der zeitliche Aufwand beträgt etwa eine Stunde Termine. Psychologie-Student/innen erhalten für die Teilnahme eine Bestätigung der VP-Stunden.

##### Datenschutz

Für die Datenverarbeitung ist Prof. Tobias Bäumer, UKSH Lübeck verantwortlich. Die Datenerhebung erfolgt zum Zweck des oben genannten Forschungsvorhabens. Es werden Name, Alter sowie die wie oben beschrieben erfassten Daten gespeichert und sicher aufbewahrt.

Die Daten werden in Papierform und auf Datenträgern im *Center of Brain, Behavior and Metabolism* (CBBM) am UKSH Lübeck aufgezeichnet und pseudonymisiert<sup>1</sup> für die Dauer von 10 Jahren gespeichert, soweit gesetzliche Vorgaben nicht längere Archivierungspflichten vorsehen. Die Auswertung, Nutzung, Weitergabe und Veröffentlichung der Daten durch den Studienleiter und seine Mitarbeiter erfolgt somit auch in pseudonymisierter<sup>1</sup> Form.

Zugriff auf Ihre persönlichen Daten (Name und Kontaktinformation) haben während Ihrer Teilnahme nur die direkt beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und anschließend nur die Studienleitung. Diese Personen sind zur Verschwiegenheit verpflichtet. Die Daten sind vor fremdem Zugriff geschützt. Entschließt sich ein/e Studienteilnehmer/in zum Abbruch der Studie, kann er/sie verlangen, dass die Daten vernichtet werden. Die Daten können in der Folge durch die Studienteilnehmer/innen nicht eingesehen und diese über anfallende personenbezogene Ergebnisse der Studie auch nicht informiert werden. Diese Studie ist durch die zuständige Ethik-Kommission beraten worden.



**Welchen persönlichen Nutzen hat die Studie für mich?**

Ein unmittelbarer Nutzen ist für die Teilnehmer nicht zu erwarten.

**Gefahren und Belastungen**

Durch die Teilnahme an der Studie sind keine besonderen gesundheitlichen Risiken oder Gefahren für die Teilnehmer zu erwarten.

**Freiwilligkeit der Teilnahme**

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie haben das Rechte, diese jederzeit ohne Angabe von Gründen zu beenden, ohne dass Ihnen dadurch Nachteile entstehen würden.

---

1 *Pseudonymisieren* ist das Ersetzen des Namens und anderer Identifikationsmerkmale durch ein Kennzeichen (einen Code aus Buchstaben oder Zahlen) zu dem Zweck, die Identifizierung des Betroffenen auszuschließen oder wesentlich zu erschweren (§ 3 Abs. 6a Bundesdatenschutzgesetz). Der verwendete Code lässt sich nur mittels einer Kodierliste der Person zuordnen. Indem alle erhobenen medizinischen und wissenschaftlichen Daten nur unter diesem Code abgespeichert werden und die Kodierliste separat und nur den Studienleitern zugänglich aufbewahrt (und nach Abschluss der Studie gelöscht) wird, ist praktisch ausgeschlossen, dass ein Zusammenhang zwischen Daten und Person hergestellt wird.



Einwilligungserklärung zur Studie:  
**„Beschreibung des Event-File-Coding im  
 somatosensorisch-motorischen System“**

Vorname, Name: \_\_\_\_\_

Geburtsdatum: \_\_\_\_\_

Ich habe die schriftliche Information zur oben genannten Studie erhalten, gelesen und verstanden. Ich wurde ausführlich – mündlich und schriftlich – durch Frau/Herrn \_\_\_\_\_ über das Ziel und den Verlauf der Studie, Chancen und Risiken der Teilnahme, meine Rechte und Pflichten und die Freiwilligkeit der Teilnahme aufgeklärt.

Ich hatte ausreichend Gelegenheit, Fragen zu stellen, um eventuelle Unklarheiten zu beseitigen. Mir wurde erklärt, dass alle Ergebnisse der Aufgabe und alles, was ich dem/der Versuchsleiter/in mitteile, der ärztlichen Schweigepflicht unterliegt, und die Ergebnisse aus der Aufgabe nur ohne Angabe meines Namens (d.h., pseudonymisiert<sup>1</sup>) bearbeitet oder weitergegeben werden.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Daten aufgezeichnet (Papierform und elektronisch) und für den Zeitraum von mindestens 10 Jahren im CBBM am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein (Campus Lübeck) archiviert werden. Ich bestätige durch meine Unterschrift, dass ich die Aufklärung verstanden habe und unter den aufgeführten Bedingungen an der Studie teilnehmen möchte.

Ich habe verstanden, dass meine Teilnahme freiwillig ist, und dass ich das Recht habe, diese jederzeit ohne Angabe von Gründen zu beenden, ohne dass mir dadurch Nachteile entstehen würden.

**Ich möchte an der Studie teilzunehmen und bin mit der oben beschriebenen Erhebung, Speicherung und Verwendung meiner Daten einverstanden.**

Lübeck, den \_\_\_\_\_

Lübeck, den \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 (Unterschrift Versuchsteilnehmer/in)

\_\_\_\_\_  
 (Unterschrift Studienleiter/in)

Name:

Name:

Im Falle von Rückfragen wenden Sie sich bitte an den Studienleiter Herrn Prof. Dr. med. Tobias Bäumer (Tel.: 0451-2903427, Email: [tobias.baeumer@neuro.uni-luebeck.de](mailto:tobias.baeumer@neuro.uni-luebeck.de)).

## Anhang A2: Sitzungsprotokoll

Studie: Tactile SR / Pilot

Studienleiter: \_\_\_\_\_

Variante: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

# Sitzungsprotokoll

## Einwilligung

Einwilligung zur Teilnahme:  Ja

## Allgemeine Information

Alter (J.):

Händigkeit:  links  rechts  beidhdg.

Geschlecht:  weiblich  männlich

## Elektrotaktile Stimulation

Stimulationsintensität:

Handrücken (links):

Handrücken (rechts):

Daumen:

kleiner Finger:

Notizen:

## Aufgabe 1

Aufgabe:

Notizen:

**Studie: Tactile SR / Pilot**

Studienleiter: \_\_\_\_\_

Variante: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

## Aufgabe 2

**Aufgabe:**

**Notizen:**

## Abschluss

**Allgemeine Notizen:**

## Lebenslauf



### Persönliche Daten

---

Name	Yasin Aktepe
Adresse	Struenseestraße 7 22767 Hamburg
Telefon	+49 173 6408948
Email	yasin.aktepe@icloud.com
Geburtsdaten	16.01.1991 in Kassel

### Schule und Ausbildung

---

Seit 01/2021	Arzt in Weiterbildung im Albertinen-Krankenhaus Hamburg
06/2020	Approbation als Arzt
04/2019 bis 06/2020	Studium der Humanmedizin Universität Hamburg
10/2015 bis 03/2019	Studium der Humanmedizin Universität zu Lübeck
10/2013 bis 10/2015	Studium der Humanmedizin Georg-August-Universität Göttingen
08/2011 bis 10/2013	Ausbildung zum Gesundheits- und Krankenpfleger Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
09/2010 bis 02/2011	Zivildienst im Ambulanten Pflegedienst AWO Kassel
2010	Abitur Oberstufengymnasium Herderschule Kassel

### Doktorarbeit

---

Seit 10/2016	Theory of Event Coding im Somatosensorischen System. Entwicklung eines somatosensorischen experimentellen Paradigmas zur Untersuchung von Stimulus-Reaktions- Kopplung.  Institut für Systemische Motorikforschung unter der Leitung von Prof. Dr. Tobias Bäumer
--------------	--

## Erklärung

Ich versichere, dass ich die beigefügte Doktorarbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt auch für alle Informationen, die dem Internet oder anderer elektronischer Datensammlungen entnommen wurden. Ich erkläre ferner, dass die von mir angefertigte Doktorarbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung im Rahmen meines Studiums war. Mir ist bewusst, dass die nachgewiesene Unterlassung der Herkunftsangabe oder die Nutzung als parallele Prüfungsleistung als Täuschungsversuch bzw. als Plagiat gewertet und mit Maßnahmen bis hin zur Zwangsexmatrikulation geahndet wird.

Die von mir eingereichte schriftliche Fassung entspricht jener auf dem elektronischen Speichermedium.

---

Ort, Datum

Unterschrift