

Aus der Neurologischen Universitätsklinik Tübingen
Abteilung Kognitive Neurologie

**Untersuchung der Rolle des vestibulären Systems für
die Wahrnehmung der Körpermaße**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Klaner, Anna Katharina

2020

Dekan (komm.): Professor Dr. D. Wallwiener

1. Berichterstatter: Professor Dr. Dr. H.-O. Karnath

2. Berichterstatter: Professor Dr. C. Plewnia

Tag der Disputation: 20.12.2018

Nihil est in intellectu quod non sit prius in sensu

Nichts ist im Verstand, was nicht zuvor in der Wahrnehmung wäre

Thomas von Aquin

Inhaltsverzeichnis

1. Abkürzungsverzeichnis	8
2. Einleitung	9
2.1. Körperwahrnehmung im Alltag	9
2.2. Selbstwahrnehmung bei Mensch und Tier	9
2.3. Begriffsdefinitionen	10
2.3.1. Unterteilung in zwei Punkte	10
2.3.2. Unterteilung in drei Punkte	10
2.3.3. Unterteilung in sechs Punkte	11
2.4. Virtuelle Realität	11
2.5. Anatomische Verbindungen	12
2.6. Definition Vestibularorgan	12
2.7. Link: Vestibularorgan - Körperrepräsentation	13
2.8. Effekte vestibulärer Stimulation	13
2.9. Definition Neglect	14
2.10. Link: Vestibularorgan - Neglect	15
2.11. Arten vestibulärer Stimulation	16
2.12. Forschungslücke	16
2.12.1. Studien an Neglect Patienten	16
2.12.2. Studien an gesunden Probanden	17
2.12.3. Gegenüberstellung Stimulationsarten	18
2.13. Forschungsfrage	18
2.14. Hypothesen	19
3. Methodik	19
3.1. Veröffentlichung	19

3.2. Versuchspersonen:	20
3.3. Design:.....	21
3.3.1. Experiment 1	21
3.3.2. Experiment 2.....	21
3.4. Materialien	21
3.4.1. Grundlagen Hospital Stroke Programm	21
3.4.2. Avatar	23
3.4.3. Aufbau eines Versuchsdurchlaufes.....	25
3.5. Prozedur	25
3.5.1. Vorbereitung	25
3.5.2. Aufgabenstellung	26
3.5.3. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation	27
3.5.4. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation	28
3.6. Datenanalyse	30
3.6.1. Berechnung der Schätzgenauigkeit	30
3.6.2. Datenanalyse zur Auswertung des Einflusses der Stimulation	31
3.6.2.1. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation	31
3.6.2.2. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation	32
4. Ergebnisse.....	32
4.1. Körpermaße der Probanden	32
4.2. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation	33
4.2.1. Fragebögen	33
4.2.2. Experiment 1.....	34
4.2.2.1. Linke Seite	34
4.2.2.2. Rechte Seite	35
4.2.2.3. Vergleich rechte Seite mit linker Seite	35

4.2.2.4. Diagramme	36
4.3. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation	39
4.3.1. Fragebögen	39
4.3.2. Experiment 2.....	39
4.3.2.1. Rechte Seite	40
4.3.2.2. Linke Seite	40
4.3.2.3. Vergleich rechte Seite mit linker Seite	40
4.3.2.4. Diagramme	41
4.3.3. Fragebogen zum Hospital Stroke Programm	44
4.3.3.1. Qualität der Simulation	44
4.3.3.2. Lösungsstrategien	45
4.4. Gegenüberstellung Experiment 1 und Experiment 2.....	46
4.4.1. Diagramme	46
4.4.1.1. Linke Seite	46
4.4.1.2. Rechte Seite	46
4.5. Zusammenfassung.....	48
5. Diskussion	48
5.1. Hauptfragestellung	48
5.2. Repräsentativität der Stichprobe	49
5.3. Einordnung der Studie	50
5.4. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation	50
5.4.1. Ergebnisse	50
5.4.2. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien.....	51
5.4.2.1. Untersuchung der taktilen Wahrnehmung	51
5.4.2.2. Untersuchung der taktilen Lokalisation	51
5.4.2.3. Untersuchung Lokalisation anatomischer Landmarken	52

5.5. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation	52
5.5.1. Ergebnisse	52
5.5.2. Bewertung des Ergebnisses	53
5.5.3. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien	53
5.5.3.1. Vergleich mit Studien an Neglect Patienten.....	53
5.5.3.2. Vergleich mit Studien an gesunden Probanden.....	54
5.5.3.3. Vergleich mit Studie ohne taktile Einflüsse	55
5.6. Gesamte Studie	55
5.6.1. Unterschiedliche Effekte der Stimulationsarten	55
5.6.2. Verminderte Aktivität visueller Cortex	55
5.6.3. Visuelle Überlagerung.....	56
5.7. Einschränkungen der Studie	57
5.7.1. Schwellenwertbestimmung	57
5.7.2. Sham-Messung Experiment 1	58
5.7.3. Sham-Messung Experiment 2.....	58
5.8. Ausblick.....	59
5.8.1. Verdienst der Studie	59
5.8.2. Ideen für die Zukunft.....	60
6. Zusammenfassung	62
7. Erklärung zum Eigenanteil	63
8. Literaturverzeichnis.....	64
9. Danksagung.....	70
10. Curriculum Vitae	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1. Abkürzungsverzeichnis

ANOVA= analysis of variance= Varianzanalyse

BPI= Body Perception Index

CVS= kalorische vestibuläre Stimulation

DK= Development Kit

GVS= galvanische vestibuläre Stimulation

L-GVS= galvanische vestibuläre Stimulation: Anode links, Kathode rechts

M= mean= Mittelwert

R-GVS= galvanische vestibuläre Stimulation: Anode rechts, Kathode links

SD= standard deviation = Standardabweichung

VR= virtuelle Realität

2. Einleitung

2.1. Körperwahrnehmung im Alltag

Die Wahrnehmung des eigenen Körpers begleitet uns durch unser tägliches Leben: Beim Blick in den Spiegel nach dem Aufstehen nehmen wir wahr, dass unsere Haare dringend gekämmt werden müssen, um die Mittagszeit vernehmen wir durch ein Grummeln im Magen, dass es höchste Zeit für eine Pause inklusive Mahlzeit ist, nach einem anstrengenden Arbeitstag merken wir Verspannungen im Rücken- und Nackenbereich und nehmen während des Feierabends beim Barfußlaufen durch den Garten das Gras der Sommerwiese an unseren Fußsohlen wahr. Dies sind nur einige wenige von unzähligen Beispielen, wie wir unseren Körper rund um die Uhr jeden Tag wahrnehmen.

2.2. Selbstwahrnehmung bei Mensch und Tier

Die Wahrnehmung des eigenen Körpers ist jedoch keine Fähigkeit, die dem Menschen vorenthalten ist, denn auch im Tierreich finden sich einige Arten, die sich ihrer Selbst bewusst sind: In der Gruppe der Vögel kann man beispielsweise beobachten, dass sich Elstern einem Fleck auf ihrem Körper, den sie alleinig durch Betrachtung ihres Spiegelbildes sehen, zuwenden (Prior, Pollok and Güntürkün, 2000). Ähnliches lässt sich auch bei einigen Säugetieren beobachten. Delfine wenden sich angemalten Stellen an ihrem Körper zu, die sie im Spiegel sehen (Reiss and Marino, 2001), dies lässt sich auch bei asiatischen Elefanten beobachten, woraus man schließen kann, dass sie sich im Spiegel erkennen können (Plotnik, Waal and Reiss, 2006). Bei Primaten wird die Fähigkeit, sich im Spiegel zu erkennen bei Menschenaffen beobachtet (Suddendorf and Collier-Baker, 2009). Führt man die Versuche an menschlichen Kindern durch, zeigt sich, dass Kinder erst am Ende des zweiten Lebensjahres fähig sind, eine Markierung an ihrem Körper durch einen Spiegel zu erkennen, und somit erst am Ende des zweiten Lebensjahres fähig sind, sich selbst wahrzunehmen (Amsterdam, 1972). Diese Fähigkeit steht bei Kindern in einem positiven Zusammenhang mit dem Vorhandensein von sozialem und altruistischem Verhalten (Gallup, Anderson and Shillito, 2002), wodurch sich

zeigt, dass die Wahrnehmung des eigenen Körpers unter anderem wichtig für das soziale Leben ist.

2.3. Begriffsdefinitionen

Die Wahrnehmung des eigenen Körpers wird auf verschiedensten Wegen gewährleistet, beispielsweise Propriozeption, Berührungen, Sehen, motorisches Verhalten, semantisches Verstehen oder emotionaler Affekt (Vignemont, 2010). Um zu beschreiben, wie der Mensch seinen eigenen Körper repräsentiert, existieren verschiedenste Begriffe, die sich, je nach Autor, von dem sie verwendet werden, teilweise auch widersprechen (Bielefeld, 1991). Dennoch möchte ich versuchen, einige Begriffe zu erläutern, zu definieren und einzuordnen.

2.3.1. Unterteilung in zwei Punkte

Die Körperrepräsentation kann laut Dijkerman und Haan (2007) sowie Gallagher (2007) in zwei Unterpunkte aufgliedert werden: das Körperschema und das Körperbild. Das Körperschema bezieht sich auf sensomotorische Repräsentationen des Körpers, mit dem Ziel Körperaktionen bzw. Bewegungen zu lenken. Im Gegensatz dazu versteht man unter dem Begriff Körperbild laut dieser Einteilung die übrigen Repräsentationen des Körpers, die keine Aktionen lenken. Jedoch lässt sich diese Theorie zur Einteilung der Körperrepräsentation aufgrund von bestimmten Krankheitsbildern widerlegen (Vignemont, 2010), weswegen die Körperrepräsentation weiter unterteilt werden muss.

2.3.2. Unterteilung in drei Punkte

Laut Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) lässt sich die Körperrepräsentation in drei hierarchische Stufen einteilen. Stufe eins entspricht der Somatosensation, die taktile Reize auf der Haut wahrnimmt, Stufe zwei entspricht der Somatoperception, die durch die Vernetzung verschiedener somatosensorischer Informationen eine Lokalisation von taktilen Reizen ermöglicht, Stufe drei entspricht der Somatorepräsentation, einem relativ abstrakten Konstrukt, das weniger vom direkten Input (Somatosensation) beeinflusst wird, und mit dessen Hilfe die Beurteilung der Größe des Körpers sowie dessen Form erfolgt. Doch auch diese Unterteilung war nicht

ausreichend, weswegen der Begriff der Körperrepräsentation weiter aufgeteilt wurde (Longo, 2016).

2.3.3. Unterteilung in sechs Punkte

Longo (2016) unterteilt die Körperrepräsentation weiter in sechs Unterpunkte: Körperbild, Körperschema, oberflächliches Schema und Körper Modell, die er als Unterpunkte der Somatoperception bezeichnet, sowie semantisches Wissen und strukturelle Beschreibung des Körpers, die er als Unterpunkte der Somatorepräsentation bezeichnet. Die Unterpunkte werden hier beispielsweise danach unterteilt, ob sie expliziten oder impliziten Charakter haben, oder wahrnehmend oder konzeptionell sind. Da er seine Unterteilung aufgrund der Ergebnisse von Studien verschiedener Autoren, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten veröffentlicht wurden trifft, hat eine mögliche Verbindung zwischen den Unterpunkten nur rein spekulativen Charakter. Zudem sind sich aktuell die Wissenschaftler über die genaue Anzahl der vorhandenen Körperrepräsentationen uneinig (Longo, 2016), wodurch für uns die Arbeit mit den verschiedenen Begrifflichkeiten erschwert ist und wir deswegen in dieser Arbeit ganz allgemein von Körperrepräsentation sprechen.

2.4. Virtuelle Realität

Um die Körperrepräsentation zu simulieren und zu modifizieren, bietet sich dank moderner Technik eine Möglichkeit, die bereits in verschiedene Bereiche der Wissenschaft Einzug gefunden hat: die virtuelle Realität. Zum einen können durch die virtuelle Realität andere Umgebungsbedingungen simuliert und deren Einfluss auf den Probanden untersucht (Kerrebroeck, Brengman and Willems, 2017), sowie Rehabilitationsmaßnahmen erleichtert (Ravi, Kumar and Singhi, 2017) oder die Schulung von medizinischem Personal verbessert werden (Javia and Sardesai, 2017; Roy, Bakr and George, 2017). Zum anderen kann durch die VR eine Körperillusion hergestellt werden, bei der durch die Sicht auf einen virtuellen Körper durch eine First-Person-Perspektive eine Identifikation mit dem virtuellen Körper erreicht (Dijkerman, 2016), sowie das Erleben des Körperbesitzes untersucht und modifiziert werden kann (Piryankova *et al.*, 2014). Dieses Prozedere ist von einer recht verbreiteten Methodik inspiriert, die

verwendet wird, um Körperbesitz zu untersuchen, der Rubber Hand Illusion (Dijkerman, 2016). Bei der Rubber Hand Illusion wird die eigene Hand verdeckt und eine aus Gummi bestehende Hand in eine für den Probanden gut sichtbare Position gebracht, die der normalen Körperhaltung entspricht, anschließend wird durch gleichzeitiges Berühren der Gummi- und der verdeckten echten Hand beim Probanden der Eindruck erweckt, die Gummihand sei Teil seines Körpers (Ramakonar, Franz and Lind, 2011). Die mannigfaltigen Bereiche, in denen die virtuelle Realität bereits eingesetzt wird, sprechen dafür, dass diese moderne Technik ihren berechtigten Einzug in die Wissenschaft gefunden hat.

2.5. Anatomische Verbindungen

Auf anatomischer Ebene gibt es Hinweise dafür, dass die Körperrepräsentation durch das somatosensorische System mit anderen Systemen verschaltet ist. Es wird von einem multisensorischen vestibulären Cortex gesprochen, der unter anderem den oberen temporalen Cortex, den sulcus centralis, die temporoparietale Übergangsregion, die Insula, sowie retro insuläre Regionen beinhaltet (Karnath and Dieterich, 2006; Eulenburg *et al.*, 2012). In diesem multisensorischen Cortex werden neben vestibulären Informationen auch visuelle, optokinetische und somatosensorische Informationen verarbeitet (Guldin, Akbarian and Grüsser, 1992; Akbarian, Grüsser and Guldin, 1994). Zudem sieht man bei Untersuchungen mit dem PET, dass bei taktiler Stimulation ähnliche Hirnregionen aktiv sind wie bei vestibulärer Stimulation (Bottini *et al.*, 1995). Des Weiteren sieht man im funktionellen MRT während Stimulation des Vestibularorgans eine Aktivierung des zentralen Sulcus, was Hinweise auf eine enge Verbindung zwischen dem Vestibularsystem und dem somatosensorischen System gibt (Fasold *et al.*, 2002). Doch was genau versteht man unter Vestibularsystem bzw. Vestibularorgan?

2.6. Definition Vestibularorgan

Das Vestibularorgan gehört anatomisch zum Innenohr und setzt sich aus drei Bogengängen, welche in den drei verschiedenen Raumebenen senkrecht zueinanderstehen, sowie dem Otolithenapparat, welcher aus Utrikulus und Sakkulus besteht, zusammen (Probst, 2008). Durch das Organ können zum

einen Drehbewegungen durch die verschiedenen Bogengänge, zum anderen Linearbeschleunigung durch den Otolithenapparat, wahrgenommen werden (Probst, 2008). Seine Hauptaufgaben bestehen aus der Wahrnehmung der Bewegung der Person und der Messung der senkrechten Lage (Karnath and Dieterich, 2006). Dadurch leistet es einen wichtigen Beitrag zur Gleichgewichtswahrnehmung.

2.7. Link: Vestibularorgan - Körperrepräsentation

Es wird zwar angenommen, dass die Körperrepräsentation im Sinne der Größenwahrnehmung ein eher abstraktes und stabiles Konstrukt ist (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013). Eine Beeinflussung der Wahrnehmung des Körpers durch das Vestibularorgan wurde jedoch von Bonnier (2009) beschrieben, wobei er bei Patienten mit vestibulären Schwindel verschiedene Symptome schilderte. Zu diesen Symptomen gehörten unter anderem der Verlust der Orientierung zur Person, Schwierigkeiten bei der räumlichen Wahrnehmung, sowie Halluzinationen, bei denen der Patient oder bestimmte Körperteile zu wachsen schienen, oder der Patient zeitweise in zwei Personen existierte. Ähnliche Zusammenhänge beobachteten auch Blanke *et al.* (2002): bei elektrischer Stimulation des rechten Gyrus angularis beobachteten sie verschiedene Symptome: neben einer sogenannten out-of-body experience, bei der die Person ihren Körper von außerhalb aus einiger Entfernung sieht, wurde auch eine Antwort auf vestibulärer Ebene sowie eine Veränderung der wahrgenommenen Länge der Arme und Beine berichtet. Aufgrund dieser Erkenntnisse lässt sich ein Zusammenhang zwischen vestibulären System und Körperrepräsentation vermuten.

2.8. Effekte vestibulärer Stimulation

Ein weiteres Indiz dafür, dass ein Zusammenhang besteht liefern auch Studien, die den Effekt von Stimulation des Vestibularorgans auf Patienten mit gestörter Körperwahrnehmung untersuchten. Durch dessen Stimulation zeigte sich bei Patienten mit verschiedensten Erkrankungen, die die Körperrepräsentation beeinflussen, eine Verbesserung der Symptome (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013), wobei zu diesen Krankheiten folgende gehören: Phantomschmerzen

(André *et al.*, 2001; Chapelain *et al.*, 2001), Somatoparaphrenie (hierbei werden eigene Teile des Körpers verleugnet) (Bisiach, Rusconi and Vallar, 1991), Makrosomatognosie (wobei Teile des Körpers als zu groß wahrgenommen werden) (Rode *et al.*, 2012), oder Anosognosie (hier werden kranke Teile des Körpers nicht wahrgenommen (Karnath, 2006)) (Cappa *et al.*, 1987). Auch die Symptomatik von Patienten mit räumlichen Neglect kann durch vestibuläre Stimulation verbessert werden (Kerkhoff and Schenk, 2012), weswegen im Folgenden zunächst genauer auf das Krankheitsbild Neglect eingegangen werden soll.

2.9. Definition Neglect

Laut Fink und Heide (2004) versteht man unter einem Neglect, auch als räumlicher Neglect bezeichnet, die Gesamtheit verschiedener Symptome, die durch fokale Läsionen des Cerebrums ausgelöst werden und dazu führen, dass der betroffene Patient nicht auf Reize, die im kontraläsionalen Raum liegen reagiert und/oder sich nicht dem kontraläsionalen Raum zuwenden kann. Je nach Patient kann sich die Symptomatik nur durch eine Vernachlässigung des kontraläsional gelegenen Raumes zeigen, oder aber auch eine Vernachlässigung der kontraläsional gelegenen Körperhälfte mit einbeziehen; eine chronische Neglect-Symptomatik zeigt sich zum Großteil bei rechtshemisphärischen Läsionen (Fink and Heide, 2004). In den USA erfahren 30 % der Überlebenden eines Apoplexes akute Symptome eines räumlichen Neglects, was jährlich 239 000 Personen entspricht (Riestra and Barrett, 2013). Bei Apoplexpatienten gilt ein räumlicher Neglect als negativer Prognosefaktor, was die Rehabilitation des Patienten angeht, beispielsweise in Bezug auf die motorische Rehabilitation oder die Verweildauer in einer Rehabilitationseinrichtung, zudem gilt bei ihnen ein räumlicher Neglect als Hauptursache von Behinderung, da er einen Verlust der Selbstständigkeit des Patienten im täglichen Leben verursacht (Spaccavento *et al.*, 2017). Folglich ist Neglect eine schwerwiegende Erkrankung sowohl für Patienten als auch für Angehörige.

2.10. Link: Vestibularorgan - Neglect

Obwohl Neglect als eine Erkrankung der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit bezeichnet werden kann (Perry and Zeki, 2000), gibt es Hinweise, dass auch eine Verbindung mit dem Vestibularorgan besteht. Eine derartige Verbindung lässt sich zum einen auch auf anatomischer Ebene nachweisen: Im funktionellen MRT wurde durch vestibuläre Stimulation eine Aktivierung des Brodmann Areals 44 beobachtet (Lobel *et al.*, 1998), bei der Untersuchung von Patienten die einen Infarkt des rechten Frontallappens erlitten haben und daraufhin Symptome eines visuellen Neglects zeigten, fanden Husain und Kennard (1996) Läsionen in ebendiesem Brodmann Areal 44. Zum anderen liefert auch die klinische Studienlage Hinweise: In verschiedenen Studien wurde durch galvanische vestibuläre Stimulation (GVS) eine Verbesserung der Neglect Symptomatik in verschiedenen Neglect-spezifischen Tests erreicht (Wilkinson *et al.*, 2014; Nakamura *et al.*, 2015; Oppenländer *et al.*, 2015). Auch bei Untersuchungen des Einflusses der kalorischen vestibulären Stimulation (CVS) auf Neglect Patienten zeigten sich verschiedene positive Effekte: Sturt und Punt (2013) beobachteten einen positiven Effekt auf den Outcome im Star Cancellation Test. Cappa, Sterzi und Vallart (1987) beobachteten einen temporären positiven Einfluss der CVS auf die Symptome des Neglects, und zwar in Bezug auf den extrapersonalen und den personalen Neglect. Als Erklärung für den positiven Effekt von CVS auf die Neglect Symptomatik könnte man benutzen, dass es durch CVS (kalt, linker Gehörgang) zu einer Verschiebung der Sichtachse nach links kommt (Ferrè, Bottini and Haggard, 2011), ähnliches wird auch von Karnath und Dieterich (2006) bei einer Erkrankung oder iatrogenen Stimulation des Vestibularorgans beschrieben: eine Abweichung der Sichtachse in Richtung des betroffenen Vestibularorgans. Bei Neglect kommt es zu einer Verschiebung der Raumachse des Patienten auf die Seite der Läsion, welche durch vestibuläre Stimulation in Richtung Normalposition gebracht werden kann (Fink and Heide, 2004). Hierdurch lässt sich der positive Effekt der vestibulären Stimulation auf die Symptomatik des Hemi Neglects (Kerkhoff and Schenk, 2012) besser verstehen.

2.11. Arten vestibulärer Stimulation

Bei der vestibulären Stimulation gibt es laut Grabherr, Lenggenhager und Macaуда (2015) drei Hauptarten: die Stimulation durch Bewegung, die galvanische vestibuläre Stimulation (GVS) und die kalorische vestibuläre Stimulation (CVS), wobei wir uns bei unserer Studie auf die bereits erwähnten Stimulationsarten der GVS und CVS beschränkten. Die GVS führt zu einer Stimulation des Vestibularorgans, bei der durch elektrischen Strom sowohl die Bogengänge als auch der Otolithenapparat aktiviert werden (Dieterich, 2006), der Proband empfindet dabei entlang der Naso-Occipitalen Achse ein subjektives Gefühl der Verkipfung (Fasold *et al.*, 2002). Zur Durchführung wird auf jeder Seite eine Elektrode (Kathode oder Anode) hinter dem Ohr auf dem Mastoid platziert: bei einer Platzierung der Anode auf der linken Seite und der Kathode auf der rechten Seite kommt es hauptsächlich zu einer Aktivierung der rechten Hemisphäre (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013). Die CVS, bei der warmes oder kaltes Wasser in den äußeren Gehörgang einer Seite injiziert wird (Arshad *et al.*, 2016), führt hingegen lediglich zu einer Stimulation des horizontalen Bogenganges (Dieterich, 2006) und der Proband nimmt einen Drehschwindel wahr (Fasold *et al.*, 2002). Durch die Stimulation wird die endolymphatische Flüssigkeit des Bogenganges in Bewegung gesetzt, bei einer Stimulation mit kaltem Wasser im äußeren Gehörgang der linken Seite kommt es zu einer Aktivierung des ipsilateralen horizontalen Bogenganges und auf kortikaler Ebene zu einer Aktivierung der gegenüber der Stimulation gelegenen Hemisphäre (Karnath and Dieterich, 2006; Ferrè, Bottini, *et al.*, 2013). Neben anderen Ansätzen gelten diese beiden Stimulationsarten des Vestibularorgans als mögliche Therapieansätze des räumlichen Neglects (Riestra and Barrett, 2013).

2.12. Forschungslücke

2.12.1. Studien an Neglect Patienten

Diese Therapieansätze sind in verschiedenen Studien, die einen positiven Einfluss von vestibulärer Stimulation auf die Symptomatik von Neglect Patienten beschreiben, belegt (Cappa *et al.*, 1987; Sturt and Punt, 2013;

Wilkinson *et al.*, 2014; Nakamura *et al.*, 2015; Oppenländer *et al.*, 2015). Da Neglect als eine Erkrankung der Körperrepräsentation gesehen werden kann (Mast *et al.*, 2014), könnte man die positiven Effekte auf Neglect Patienten als Effekte von vestibulärer Stimulation auf die Körperrepräsentation sehen. Jedoch ist es bei Neglect Patienten schwierig, die Körperrepräsentation isoliert zu untersuchen, da zum einen Neglect nicht nur durch einen Apoplex, sondern beispielsweise auch durch Neoplasien oder Traumata ausgelöst werden kann (Li and Malhotra, 2015) und ihm somit unterschiedliche Ursachen mit unterschiedlichen Begleitsymptomen zu Grunde liegen. Zum anderen zeigt sich eine unterschiedliche Symptomatik, die nicht nur auf die Person, sondern auch den Raum bezogen sein kann (Fink and Heide, 2004), wobei sich die Symptomatik eines einzelnen Patienten im Krankheitsverlauf verändern kann (Li and Malhotra, 2015). Deswegen ist es interessant zu untersuchen, ob vestibuläre Stimulation auch einen Einfluss auf die Körperrepräsentation bei gesunden Probanden hat, da diese Daten aufgrund von weniger Störfaktoren repräsentativer und leichter zu reproduzieren sind.

2.12.2. Studien an gesunden Probanden

Betrachtet man die bisherigen Forschungsergebnisse, die den Einfluss der vestibulären Stimulation auf die Wahrnehmung des Körpers bei gesunden Probanden untersuchen, zeigte sich beispielsweise durch vestibuläre Stimulation eine Verbesserung der taktilen Wahrnehmung (Ferrè, Bottini and Haggard, 2011; Ferrè, Bottini, *et al.*, 2013; Ferrè, Day, *et al.*, 2013), sowie eine Veränderung der wahrgenommenen Handgröße (Lopez *et al.*, 2012; Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013); jedoch sind diese Studien aufgrund eines unterschiedlichen Versuchsaufbaus sowie unterschiedlicher Arten der Stimulation nicht direkt miteinander vergleichbar. Eine Gemeinsamkeit der genannten Studien bestand jedoch darin, dass sie die Körperrepräsentation nur an einzelnen Körperteilen untersuchten. Da wir unseren Körper aber nicht nur an einzelnen Teilen, sondern als Ganzes wahrnehmen, ist es wichtig, die Wahrnehmung des Körpers an möglichst vielen Körperteilen zu untersuchen. Eine weitere Gemeinsamkeit der Studien ist, dass sie anhand von taktilen Messmethoden die Körperrepräsentation untersuchten. Da im

multisensorischen vestibulären Cortex neben vestibulären und somatosensorischen Informationen auch visuelle Informationen verarbeitet werden (Guldin, Akbarian and Grüsser, 1992; Akbarian, Grüsser and Guldin, 1994), ist es jedoch ebenso von Bedeutung, die Körperrepräsentation auf visueller Ebene zu untersuchen, und nicht nur, wie in den oben genannten Studien auf taktiler Ebene.

Über den Einfluss von vestibulärer Stimulation auf die Wahrnehmung der Größe von verschiedenen Körperteilen auf visueller Ebene gibt es nach unserem Wissen noch keine Erkenntnisse.

2.12.3. Gegenüberstellung Stimulationsarten

Zudem wurde nach unserem Wissen bisher in Studien entweder durch GVS oder durch CVS stimuliert, ein direkter Vergleich dieser beiden Stimulationsarten miteinander, an gleichen Probanden und mit einer gleichen Messmethode, ist interessant, um mögliche Unterschiede der beiden Stimulationsarten aufzuzeigen. Deswegen wurde unsere Studie in zwei Experimente aufgeteilt, bei denen einmal durch GVS einmal durch CVS stimuliert wurde. Dadurch, dass die GVS eine genaue Einstellung der Intensität der Stimulation erlaubt, ist es möglich, unterhalb der Wahrnehmungsschwelle zu stimulieren, wodurch keine Nebeneffekte wie Schwindel oder Wahrnehmung des Stromflusses durch die Haut auftreten, und somit keine Verfälschung der Ergebnisse durch Nebeneffekte, die die Aufmerksamkeit beeinflussen, zu erwarten ist (Oppenländer *et al.*, 2015; Lopez, 2016). Im Gegensatz dazu ist die CVS schwieriger zu kontrollieren, beispielsweise in Stimulationsdauer und Intensität (Ferrè, Day, *et al.*, 2013), und führt zu Drehschwindel (Fasold *et al.*, 2002). Dadurch, dass die CVS im Vergleich zur GVS jedoch zu einer stärkeren Stimulation führt (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013), ist es möglich, dass ein schwächerer Effekt nur durch die CVS ausgelöst wird.

2.13. Forschungsfrage

Mithilfe unserer Studie haben wir untersucht, ob verschiedene Arten der vestibulären Stimulation bei gesunden Probanden einen Einfluss auf die Körperrepräsentation auf visueller Ebene - in Form der visuellen Wahrnehmung

der Arm- und Beinlänge - haben, und ob es dabei Unterschiede im Vergleich des Effektes von GVS und CVS gibt. Hierbei wurde die visuelle Wahrnehmung durch virtuelle Realität simuliert und modifiziert.

2.14. Hypothesen

Durch den Vergleich beider Stimulationsarten lassen sich verschiedene Thesen je nach auftretendem Ergebnis formulieren. Bei einem Effekt der bei der CVS, nicht aber bei der GVS beobachtet wird, könnte man annehmen, dass dies entweder dadurch zustande kommt, dass durch die CVS eine überschwellige, und damit stärkere Stimulation erfolgt, welche für einen messbaren Effekt nötig ist, oder aber, dass es durch den Schwindel zu einer Beeinflussung der Aufmerksamkeit kommt, welche für den Effekt verantwortlich ist. Ein Effekt, der sowohl durch CVS als auch durch GVS ausgelöst wird, könnte darauf hinweisen, dass der gefundene Effekt sowohl durch überschwellige, als auch durch unterschwellige Stimulation des Vestibularorgans ausgelöst und eine Beeinflussung der Aufmerksamkeit durch Nebeneffekte als Ursache ausgeschlossen werden kann, da der Effekt auch bei der unterschwelligen GVS beobachtet wird. Bei einem Effekt, der durch GVS, nicht aber durch CVS ausgelöst wird, könnte man damit argumentieren, dass die GVS sowohl die Bogengänge als auch den Otolithenapparat stimuliert, die CVS hingegen nur den horizontalen Bogengang (Dieterich, 2006), und somit ein Effekt nur durch eine Stimulation des gesamten Vestibularorgans ausgelöst wird. Tritt hingegen durch beide Stimulationsarten kein messbarer Effekt auf, könnte man davon ausgehen, dass vestibuläre Stimulation keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der Länge der Arme und Beine hat. Somit lassen sich durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Stimulationsarten mögliche Gründe für die gefundenen Effekte besser abgrenzen.

3. Methodik

3.1. Veröffentlichung

Teile dieser Arbeit wurden im Jahr 2019 durch die Online-Fachzeitschrift PLOS ONE veröffentlicht. Der Artikel trägt den Namen "Visual perception of one's own

body under vestibular stimulation using biometric self-avatars in virtual reality” und wurde von Hans-Otto Karnath, Simone Claire Mölbert, Anna Katharina Klaner, Joachim Tesch, Katrin Elisabeth Giel, Hong Yu Wong und Betty J. Mohler verfasst.

3.2. Versuchspersonen

Für die Studie wurden insgesamt 25 gesunde Versuchspersonen rekrutiert, sie meldeten sich freiwillig auf eine Rundmail der Universität Tübingen und wurden für den ihnen entstandenen Aufwand mit einer finanziellen Probandenvergütung entschädigt. Von den 25 Probanden wurden drei ausgeschlossen. Ein Grund hierfür war die Modifikation des Experiments, nachdem die Messungen an den ersten zwei Probanden durchgeführt wurden, wodurch die Ergebnisse dieser zwei Teilnehmer nicht mehr mit den übrigen vergleichbar waren. Außerdem gab es un plausible Ergebnisse bei einem Probanden, bei dem bei Analyse der Werte die verrechneten Werte beider Arme für alle Durchgänge exakt gleich waren. Deswegen wurde er aus der Analyse ausgeschlossen, um eine Verfälschung der Daten zu verhindern. Die verbleibenden 22 Teilnehmer waren 18-30 Jahre alt, mit einem mittleren Alter von 23.35 Jahren (± 3.65 Jahre SD), zehn von ihnen waren männlich, der Altersbereich betrug 18-30 Jahre, mit einem durchschnittlichen Alter von 24.80 Jahren (± 3.68 Jahre SD) und zwölf weiblich, hier betrug der Altersbereich ebenfalls 18-30 Jahre, mit einem durchschnittlichen Alter von 22.33 Jahren (± 3.70 Jahre SD). Laut eigener Aussage waren von allen 22 Probanden 20 Rechtshänder, dies entsprach einem Anteil von 90.91%. 21 der 22 Versuchsteilnehmer absolvierten sowohl Experiment 1 als auch Experiment 2, ein Proband lediglich das Experiment 1. Die für diesen Stichprobenumfang mit der Software GPower 3.0.10 errechnete Post-Hoc Power betrug 0.99 (verwendete Effektgröße $f=0.25$, Korrelation $\text{corr}=0.80$).

Die Studie wurde nach den ethischen Richtlinien der Deklaration von Helsinki durchgeführt und von der Ethik Kommission als unbedenklich beurteilt (Ethikantragnummer 471/2016BO2).

3.3. Design

Die Studie bestand aus zwei Experimenten, welche beide in einem ruhigen Raum durchgeführt wurden, während der Versuchsleiter die ganze Zeit anwesend war. An beiden Tagen fand das Experiment nach ähnlichem Ablauf statt, es gab jeweils drei Versuchsdurchläufe, nach dem ersten und dem zweiten Versuchsdurchlauf fand jeweils eine Pause von 15 Minuten statt. Die Grundaufgabe des Probanden blieb dieselbe, jedoch wurde zeitweise auf unterschiedliche Arten das Vestibularorgan stimuliert.

3.3.1. Experiment 1

Das Experiment 1 dauerte ca. 90 Minuten. Die drei in Experiment 1 durchgeführten Versuchsdurchläufe bestanden aus einer Prä-Messung, 15 Minuten Pause, einer Messung unter Stimulation des Vestibularorgans, dabei wurde das Vestibularorgan durch GVS stimuliert. Anschließend folgten 15 Minuten Pause und zuletzt eine Sham-Messung.

3.3.2. Experiment 2

Das Experiment 2 dauerte ca. 60 Minuten, und bestand ebenfalls aus drei Versuchsdurchläufen. Es startete erneut mit einer Prä-Messung und 15 Minuten Pause, anschließend folgte eine Messung unter Stimulation des Vestibularorgans, diesmal wurde durch CVS stimuliert, 15 Minuten Pause und zuletzt eine Post-Messung.

In beiden Experimenten wurden an unterschiedlichen Tagen dieselben Probanden gemessen. Die Zeitspanne zwischen den Versuchstagen war für unsere Untersuchung nicht von Belang und betrug durchschnittlich 6.30 Tage SD= 4.70.

3.4. Materialien

3.4.1. Grundlagen Hospital Stroke Programm

Um die Körperrepräsentation der Probanden, die sich in unserem Fall auf die Wahrnehmung der Länge der Extremitäten bezog, möglichst realitätsgetreu zu untersuchen, wurde das Computerprogramm „Hospital Stroke HMD“ verwendet, welches vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen in Unity

4.6.3f1 runtime 0.4.4 entwickelt wurde. Das Programm simuliert dem Probanden einen biometrischen Avatar mit der vom Probanden selbstberichteten Körpergröße und Gewicht, welcher in Arm- und Beinlänge verstellbar ist. Der Proband sieht diesen aus der Egoperspektive und schätzt die Arm- und Beinlänge des Avatars ein, bis sie mit seinen als real empfundenen Körpermaßen übereinstimmen. Das Programm verrechnet diese Veränderung und modifiziert den Avatar entsprechend. Für die Erstellung des virtuellen Körpers wurden Körpermodelle aus dem CAESAR-Datensatz verwendet (Robinette, Daanen and Paquet, 1999). Hierbei wurden die Körperformen von 96 Probanden im Alter von über 60 Jahren verwendet und gemittelt, um den durchschnittlichen Körper eines über 60-Jährigen zu erhalten. Dieser Datensatz wurde gewählt, um die Ergebnisse besser mit der Klinikpopulation vergleichen zu können, die zumeist einen hohen Altersdurchschnitt hat. Das aus dem Datensatz hervorgegangene Körpermodell wurde anhand von Schritthöhe, Größe, Gewicht, und Geschlecht des Probanden individuell auf seine Körpermaße angepasst. Die Farbinformation der Körperform wurde durch eine Textur bestimmt, die für beide Geschlechter identisch war (*Abbildung 1*).

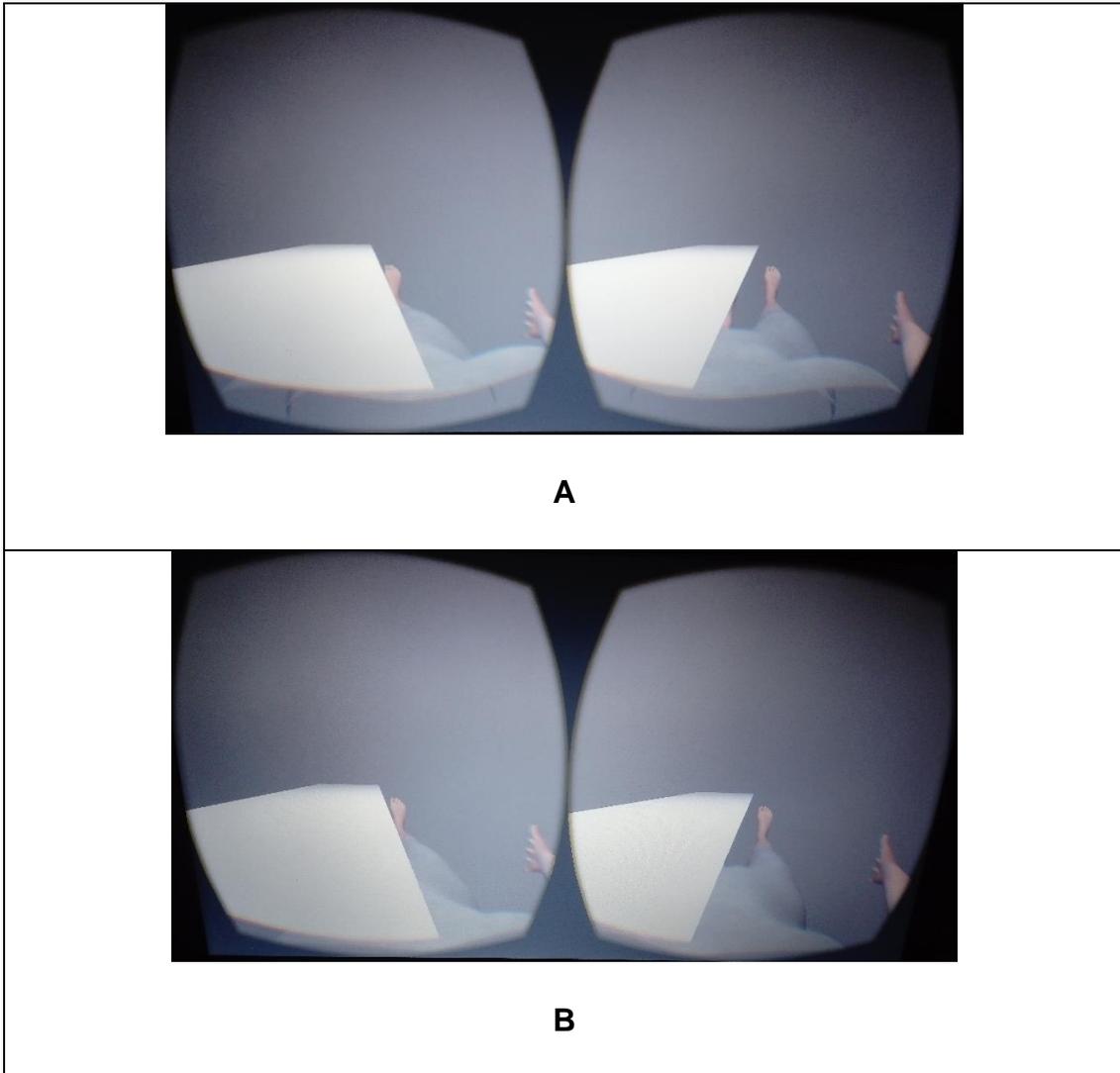


Abbildung 1. Darstellung von Avataren verschiedener Geschlechter mit gleicher Textur bei gleichen Voreinstellungen. Die beiden Kästchen entsprechen den zwei Displays der „Brillengläser“, mit denen der Proband durch die VR-Brille schaut. **A** weiblich, **B** männlich

3.4.2. Avatar

Der Proband lag auf einem Bett mit 30° Oberkörperhochlagerung. Durch eine mit dem PC verbundene virtuelle Realitäts-Brille (=VR-Brille) (Oculus Rift Development Kit 2 runtime 0.4.4 (DK2)), sah er aus der Ich-Perspektive auf den Körper seines Avatars, der in A-Pose (Arme im 45° Winkel vom Körper abgestreckt), in einer Umgebung lag, die grau und ohne räumliche Orientierungspunkte war (*Abbildung 2*). Der Oberkörper des Avatars war 20°

hochgelagert und sein Gesicht wurde von einem 3D Modell der Oculus Rift verdeckt, um eine Identifikation des Probanden mit dem Avatar zu erleichtern. Bei Bewegungen des Kopfes wurde die Ausrichtung durch die eingebaute inertielle Messeinheit der VR-Brille registriert, durch das Computerprogramm verrechnet und der Blickwinkel des Probanden auf den Avatar entsprechend angepasst. Durch das Anpassen des Blickwinkels auf den Avatar an die Kopfbewegung des Probanden wurde eine Identifikation mit dem Avatar erleichtert (Piryankova *et al.*, 2014). Des Weiteren wurde es dem Probanden ermöglicht, die Extremitäten seines Virtuellen-Ichs realitätsnah zu betrachten. Hierbei war es dem Versuchsteilnehmer jedoch nicht möglich, die Körperteile des Avatars zu bewegen.

Die Sicht des Probanden auf die gerade nicht gemessene Körperhälfte des Avatars wurde vom Oberkörper bis zu den Zehenspitzen durch eine weiße Abdeckung blockiert, außerdem wurden der Arm und das Bein, das sich unter dieser Abdeckung befand, in einer Länge dargestellt, die 50% der gemessenen Länge der Extremitäten entsprach. Dies hatte den Zweck zu verhindern, dass während der Messung eine Orientierung an den Extremitäten der gegenüberliegenden Körperhälfte stattfand.

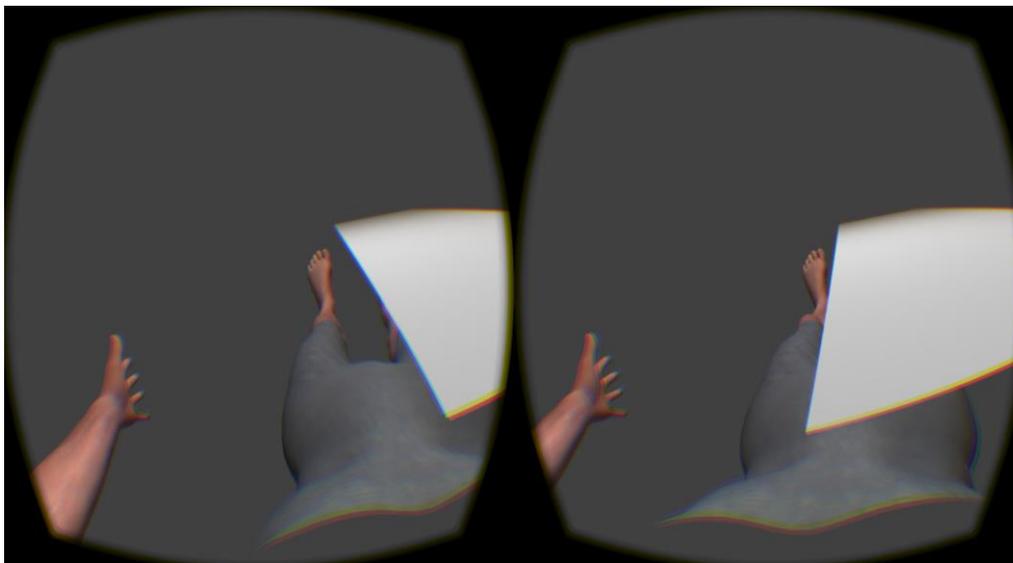


Abbildung 2. Computerscreenshot von Hospital Stroke HDM, während Messung der linken Seite. Die beiden Kästchen entsprechen den zwei Displays der „Brillengläser“, mit denen der Proband durch die VR-Brille schaut.

3.4.3. Aufbau eines Versuchsdurchlaufes

Ein Versuchsdurchlauf bestand aus 20 Durchgängen (Trials) und je Trial wurde eine Seite getestet, wobei bei jeder Seite zunächst die Länge des Armes und anschließend des Beines eingestellt werden musste. Die Startlängen der Extremitäten wurden in Prozent der real gemessenen Extremitäten-Länge angegeben. Für Arm und Bein einer Seite wurde jeweils die gleiche Prozentzahl der tatsächlichen Arm- und Bein- Länge verwendet und zwar 60, 65, 70, 75, 80, 120, 130, 135 bzw. 140%. Bei 10 der 20 Durchgänge wurde die linke Seite getestet, dabei betrug die Startlänge der Extremitäten im Mittel 100 Prozent der Länge der realen Extremitäten ($\pm 32\%$ SD, Minimum=60%, Maximum=140%). Bei den restlichen 10 Durchgängen wurde die rechte Seite getestet, hierbei betrug die Startlänge der Extremitäten im Mittel 100% der in Wirklichkeit gemessenen Extremitäten ($\pm 32\%$ SD, Minimum=60%, Maximum=140%). Die Reihenfolge, welche Prozentzahl der tatsächlichen Körperlänge in welchem Durchgang als Startlänge verwendet wurde, war dabei randomisiert. Im Endeffekt waren auf der linken Seite während insgesamt fünf Trials die Extremitäten des Avatars kürzer als die tatsächliche Länge der Extremitäten des Probanden. Während der übrigen fünf Trials waren sie länger als die reale Länge. Gleiches traf auch für die rechte Seite zu. Das selbe randomisierte Muster wurde bei allen Versuchsdurchläufen beider Experimente und bei allen Probanden angewandt.

3.5. Prozedur

3.5.1. Vorbereitung

Am ersten Tag, vor Beginn der Messungen, wurde der Proband zunächst über das Ziel und den Ablauf der Studie in Kenntnis gesetzt, sowie schriftlich und mündlich aufgeklärt. Dabei wurde er über mögliche Risiken der Simulation, insbesondere eine Simulatorübelkeit und Risiken der vestibulären Stimulation wie Schwindel, Kopfschmerzen oder Übelkeit informiert und gab anschließend eine schriftliche Einwilligungserklärung ab. Daraufhin erfolgte eine kurze Anamnese zum Ausschluss von Krankheiten, bei denen das Experiment gefährlich für den Probanden wäre oder die Versuchsergebnisse verfälscht

würden, beispielsweise Erkrankungen des Gleichgewichtsorgans und Ohres (vor allem Trommelfell), Sehstörungen, psychische und neurologische Erkrankungen, vor allem mit Einfluss auf die Körperrepräsentation. Zudem wurde bei den weiblichen Probanden anamnestisch eine Schwangerschaft ausgeschlossen.

Die Körpermaße wurden teils anamnestisch, teils per Maßband festgestellt. Hierbei wurde die Armlänge vom tuberculum majus zu den Fingerspitzen, die Länge der Beine (=Schritthöhe) von der breitesten Stelle der Hüfte zum Boden gemessen. Die Messungen wurden mindestens zweimal durchgeführt, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu garantieren. Außerdem wurden die Probanden zu ihrem Gewicht und ihrer Körpergröße befragt. Diese Werte wurden vom Versuchsleiter in das Hospital Stroke Programm eingegeben, um den individuellen Avatar zu berechnen.

3.5.2. Aufgabenstellung

Anschließend wurde der Proband vom Versuchsleiter in die Grundaufgabe eingewiesen, welche mit Hilfe der aufgesetzten VR-Brille durchgeführt wurde. Die Aufgabe bestand darin, die virtuelle Arm- und Beinlänge dem eigenen Körpergefühl anzupassen, dabei war es wichtig, dass der Proband seine reale Liegeposition der Position des Körpers des Avatars, den er durch die Brille sah, anpasste und seinen Blick der jeweiligen Extremität zuwandte, um auch hierdurch eine größtmögliche Identifikation mit dem Avatar zu erreichen (Piryankova *et al.*, 2014) (*Abbildung 3*). Der Proband wurde explizit darauf hingewiesen, während des gesamten Versuchs nach seinem Körpergefühl zu handeln. Die Längenanpassung geschah durch verbale Anweisungen an den Versuchsleiter, welche beinhalteten, die Extremität länger oder kürzer einzustellen. Dieser justierte daraufhin die Länge der entsprechenden virtuellen Extremität am Computer im Hospital Stroke Programm durch verschiedene Tastenkombinationen in Schritten von 2,5 Prozent der realen Länge, bis sie mit dem Körpergefühl der realen Extremität des Probanden übereinstimmte und dies vom Probanden mit dem Wort „Stopp“ signalisiert wurde. Daraufhin wurde vom Versuchsleiter noch einmal nachgefragt, ob der Proband sich sicher sei, bevor fortgefahren wurde.

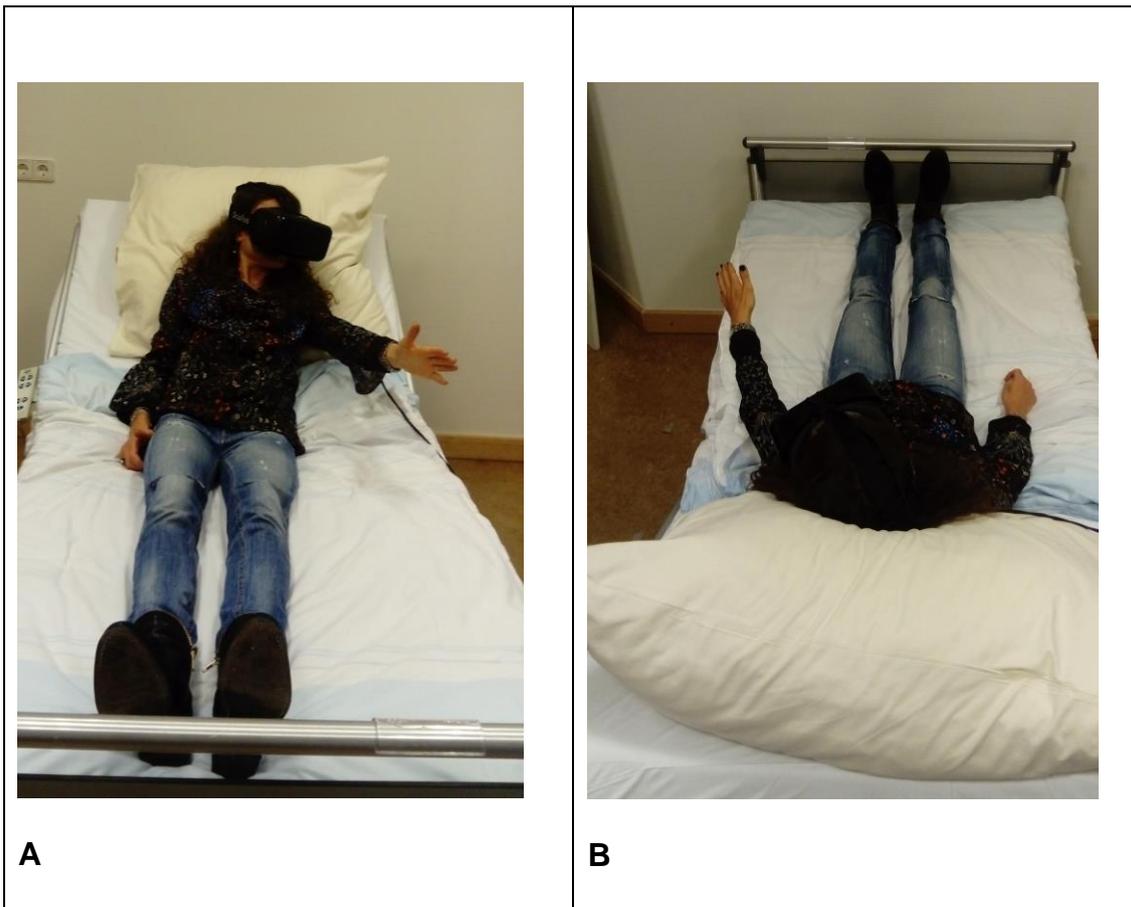


Abbildung 3. Fotos von Proband während Messung der linken Seiten, aus verschiedenen Perspektiven.

3.5.3. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation

Das Experiment setzte sich aus drei Versuchsdurchläufen zusammen. Der erste Durchlauf war eine Prä-Messung mit 20 Durchgängen (Trials), der wie oben beschrieben durchgeführt wurde. Nach einer 15-minütigen Pause folgte Versuchsdurchlauf Nummer zwei, während dem die GVS durchgeführt wurde. Dabei wurden zunächst zwei 5x7cm große Gummielektroden, Anode links und Kathode rechts, auf dem Mastoid des Probanden mithilfe von EEG Paste und einem Gummistirnband befestigt, welche an einen DC Stimulator Plus der Firma Neuro Conn angeschlossen wurden. Dann wurde das vestibuläre System mit unterschwelligem Gleichstrom (Programmeinstellung „single mode“) stimuliert. Die Wahrnehmungsschwelle wurde bei jedem Probanden durch ein von Wilkinson *et al.* (2005) angewandtes Stufenmodell individuell bestimmt:

Hierbei wurde mit einer Stromstärke von 0.1 mA begonnen und in 0.1 mA Schritten die Stärke langsam erhöht, bis der Proband einen prickelnden bzw. kribbelnden Effekt (engl. „tingling effect“) im Bereich der Elektroden verspürte. Nachdem dieser Effekt aufgetreten war, wurde der Gleichstrom um 0.3 mA herabgesetzt, um ihn wieder in 0.1 mA Schritten ansteigen zu lassen und den Schwellenwert zu verifizieren (Wilkinson *et al.*, 2005). Während des Versuchsdurchlaufs wurde das Vestibularorgan des Probanden mit 95%-er Stärke des Schwellenwertes stimuliert.

Nach dem Versuchsdurchlauf wurde durch den Probanden ein zuvor vom Versuchsleiter selbst konstruierter Fragebogen zum subjektiv empfundenen Schwindel während der GVS ausgefüllt. Dieser beinhaltete Fragen zu Vorhandensein von Schwindel während der Stimulation und Stärke des Schwindels (Angabe in numerischer Rating Skala zur subjektiven Einschätzung), sowie Zeitpunkt des Einsetzens des Schwindels und dessen Dauer, außerdem Vorhandensein von Übelkeit und anderen, durch die Stimulation bedingten Veränderungen am Körper. Anschließend folgten 15 Minuten Pause, während dieser der Proband auch den Raum verlassen durfte. Es folgte Versuchsdurchlauf drei in Form einer Sham-Messung. Hierbei wurden die Elektroden erneut wie während der GVS am Mastoid des Probanden befestigt, jedoch ohne das Wissen des Probanden kein Gleichstrom während der Messung angeschaltet. Ansonsten lief dieser Versuchsdurchlauf genauso wie die oben beschriebene Messung unter GVS ab. Nach der Sham-Messung wurde durch den Probanden erneut ein Fragebogen zum während der Sham-Messung subjektiv wahrgenommenen Schwindel ausgefüllt. Die Fragen waren die gleichen wie bei dem vorherigen Fragebogen.

3.5.4. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation

Das Experiment an Tag zwei bestand aus drei Versuchsdurchläufen. Aufklärung und Vermessung des Probanden waren nicht mehr notwendig, der Versuchsleiter vergewisserte sich lediglich, ob die Aufgabenstellung noch klar war, bei Bedarf wurden die Instruktionen wiederholt und Fragen geklärt. Versuchsdurchlauf eins war simultan zu jenem von Experiment 1: eine Prä-Messung ohne jegliche Stimulation, mit anschließender 15-minütiger Pause.

Vor Beginn des zweiten Durchlaufs wurde mittels eines Otoskops die Membrana tympani des linken Ohres auf Verletzungen untersucht, um ein Eindringen von Wasser durch die folgende Stimulation in das Auris media auszuschließen. Bei allen Probanden war diese Untersuchung unauffällig. Daraufhin wurden die CVS durchgeführt. Dabei wurde mit einer 100ml fassenden Blasenspritze (BD Plastipak), an dessen Spitze sich ein auf ca. 4 cm gekürzter Plastikschlauch mit einem Durchmesser von 1,5 mm befand, 80-160 ml eisgekühltes Wasser in den linken Ductus acusticus externus des Probanden gespritzt und die überlaufende Flüssigkeit mit einer Nierenschale am linken Hals des Probanden aufgefangen. Der Oberkörper des Probanden wurde dabei um 30° hochgelagert, damit die horizontalen Bogengänge stimuliert wurden (Arshad *et al.*, 2016). Der, je nach Proband während bzw. kurz nach der Stimulation einsetzende rechts-Nystagmus wurde anhand einer Frenzelbrille kontrolliert und dadurch der Erfolg der Stimulation verifiziert. Daraufhin wurde zügig der zweite Versuchsdurchlauf gestartet, der diesmal nur zehn Durchgänge beinhaltete, die den ersten zehn Durchgängen des randomisierten Trial-Muster entsprachen. Diese kürzere Versuchsdauer wurde gewählt, da die Stimulation des Vestibularorgans durch CVS nur für eine kurze Zeitspanne anhielt. Auf eine erneute Stimulation nach Ende des Schwindelgefühls wurde verzichtet, um den Probanden zu schonen, da die Stimulation Drehschwindel und subjektiv empfundene Übelkeit hervorruft. Während der Messung wurde notiert, nach wie vielen Durchgängen subjektiv das Schwindelgefühl des Probanden sistierte; für die statistische Auswertung wurden lediglich jene Durchgänge eingeschlossen, während derer der Proband Schwindel wahrnahm. Nach dem Versuchsdurchlauf wurde das Experiment 15 Minuten unterbrochen und der Proband während dieser Zeit vom Versuchsleiter beobachtet, um sein gesundheitliches Wohlbefinden zu gewährleisten. Nach dem Ende der Pause wurde durch den Probanden ein Fragebogen zum subjektiv empfundenen Schwindel während der CVS ausgefüllt (simultaner Aufbau wie bei GVS). Außerdem füllte er einen von Mölbert *et al.* (2018) erstellten Fragebogen zur Wirkung des Avatars und Bearbeitungsstrategien aus. Dabei wurden folgende Fragen bearbeitet: Ähnlichkeit des Avatars zum

Probanden in folgenden Punkten: Gesamteindruck, Figur (z.B. Proportionen), Aussehen (wie Proband oder jemand Fremder), Arme, Beine und Oberkörper (Angaben hierzu wurden in einer 7-stufigen Likert-Skala zur subjektiven Einschätzung gemacht, die von gar nicht zu sehr reichte). Außerdem gab es Fragen dazu, ob der Proband das Gefühl hatte, sich durch das Programm und die Brille in einer virtuellen Umgebung zu befinden und welche Strategien genutzt wurden, um die Aufgabe zu meistern. Zuletzt wurde noch darauf eingegangen, wie der Avatar auf den Probanden gewirkt hat, ob es Teile des Körpers gab, die eigenartig empfunden wurden und welche das waren. Nun wurde Versuchsdurchlauf drei in Form einer Post-Messung durchgeführt, die vom Ablauf identisch zur Prä-Messung war.

3.6. Datenanalyse

Die Daten wurden mit dem Programm IBM SPSS Statistics 24 ausgewertet.

3.6.1. Berechnung der Schätzgenauigkeit

Während der Versuchsdurchläufe wurden die von den Probanden geschätzten Längen der Extremitäten in Prozent der tatsächlichen Länge erhoben, welche in absolute Längen transformiert und mit den realen, zu Beginn des Experiments gemessenen Werten, verrechnet wurden. Der dabei erhaltene Wert wird im Folgenden als Body Perception Index (BPI) bezeichnet und wurde mit folgender Formel berechnet:

$$BPI = \frac{\text{Länge geschätzt}}{\text{Länge gemessen}} \times 100$$

Dieser Wert wurde für jeden Trial, für jede Extremität und jeden Probanden ermittelt. Die BPI-Werte wurden anschließend für Arm und Bein einer Seite folgendermaßen zusammengefasst:

$$BPI_{\text{LinkeSeite}} = \frac{BPI_{\text{LinkerArm}} + BPI_{\text{LinkesBein}}}{2}$$

$$BPI_{\text{RechteSeite}} = \frac{BPI_{\text{RechterArm}} + BPI_{\text{RechtesBein}}}{2}$$

Auch dies erfolgte für jeden Probanden und jeden Trial.

Bei den während Experiment 2 im Versuchsdurchlauf der CVS ermittelten Daten wurden für die folgende Datenauswertung nur jene eingeschlossen, bei welchen subjektiv Schwindel auftrat.

3.6.2. Datenanalyse zur Auswertung des Einflusses der Stimulation

Zur Analyse der Daten wurden verschiedene ANOVAs durchgeführt, um zu testen, ob die beiden vestibulären Stimulationen einen Einfluss auf die Schätzgenauigkeit hatten. Die Nullhypothese besagte, dass kein Unterschied der Messgenauigkeit der Extremitäten während der Messbedingungen bestand. Um das Auftreten des Fehlers erster Art beim multiplen Testen entgegenzuwirken, wurde die Bonferroni-Korrektur angewendet und das Signifikanzniveau mit folgender Formel angepasst: $p = \frac{\alpha}{k}$ (mit $\alpha = 0,05$, $k=3$), daraus ergab sich ein neues Signifikanzniveau von $p=0.01\bar{6}$ (Weiß, 2010:190).

3.6.2.1. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation

Die für die Seiten zusammengefassten Daten wurden mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung getestet. Dabei ergab sich für beide Seiten während jeder Messbedingung ein nicht signifikantes Ergebnis, weswegen die Nullhypothese, die Daten seien normalverteilt, angenommen wurde.

Zunächst wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Hierbei wurde als erster within-subject factor die Seite (rechts oder links) verwendet, als zweiter within-subject factor die Messbedingung (Prä-Messung, Stimulation, Sham-Messung). Durch diese Analyse sollte untersucht werden, ob ein signifikant messbarer Unterschied zwischen den beiden Seiten während des Experiments vorhanden war bzw. ob ein signifikant messbarer Effekt zwischen den einzelnen Versuchsdurchläufen auftrat. Anschließend wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Als within-subject factor wurde erneut die Messbedingung verwendet. Diese Analyse wurde für beide Seiten getrennt durchgeführt, folglich für die erste ANOVA nur die Daten der linken Seite, für die

zweite ANOVA nur die Daten der rechten Seite verwendet. Durch diese Separation sollten mögliche signifikante Veränderungen, die sich während der Durchläufe des Experiments lokalisiert auf nur einer Seite zeigten, aufgedeckt werden.

Anschließend wurden zwei t-Tests für gepaarte Stichproben durchgeführt, um die einzelnen Messbedingungen untereinander zu vergleichen. Dabei wurden die Werte der rechten und linken Seite wieder separat betrachtet. Durch diesen Test konnten mögliche vorher gefundene signifikante Effekte genauer lokalisiert und bestimmt werden, ob und wann während des Experimentes Unterschiede in der Einschätzung der Länge der Extremitäten auftraten.

Außerdem wurde noch ein t-Test durchgeführt, der die Mittelwerte der rechten mit der linken Seite während den einzelnen Messbedingungen verglich, um zu sehen, ob es einen Unterschied zwischen den BPI-Werten beider Seiten gab.

3.6.2.2. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation

Auch die hierbei ermittelten Daten, für beide Extremitäten einer Seite zusammengefasst, wurden mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung getestet. Dabei waren die Daten für beide Seiten während jeder Messbedingung nicht signifikant, weswegen auch hier die Nullhypothese, die Daten seien normalverteilt angenommen wurde.

Anschließend wurden die gleichen Schritte wie bei Experiment 1 angewandt, wobei hier die Messbedingungen aus Prä-Messung, Stimulation und Post-Messung bestanden.

4. Ergebnisse

4.1. Körpermaße der Probanden

Die gemessene Armlänge betrug durchschnittlich 0.67m (SD= \pm 0.06m), die Beinlänge (=Schritthöhe) durchschnittlich 0.85m (SD= \pm 0.08m) und die Körpergröße im Durchschnitt 1.74m (SD= \pm 0.09m). Bei der Befragung zum Gewicht wurde im Mittel 68.27kg (\pm 13.25kg SD) angegeben.

4.2. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation

4.2.1. Fragebögen

Die Auswertung der beiden Fragebögen zeigte, dass während der GVS fünf der 22 Probanden, die dieses Experiment absolvierten, subjektiv Schwindel empfanden. Dies entsprach 22.73%. Auf einer numerischen Rating-Skala gaben diese fünf Probanden im Mittel eine Stärke von zwei ($SD = \pm 1$) an, wobei hier null keinem Schwindel und zehn sehr starkem Schwindel entsprach. Der Schwindel trat bei diesen Probanden im Durchschnitt nach vier Minuten ($SD = \pm 4.58$) auf und dauerte durchschnittlich 2.6 Minuten ($SD = \pm 2.51$). Acht der 22 Probanden verspürten eine Veränderung an ihrem Körper, dies entsprach 36.36%. Die Körperveränderungen wurden auf unterschiedliche Art und Weise beschrieben, beispielsweise als Einschränkung des Sehens durch Auftreten eines Tunnelblicks, Schwierigkeiten beim Einschätzen der Körpermaße, gesteigerte Wachheit gefolgt von Müdigkeit, Kopfschmerzen oder Hitze im Bereich des Ohres bzw. Kribbeln unter den Elektroden. Drei dieser acht Probanden (37.50%), gehörten zu jenen, welche subjektiv Schwindel empfanden. Von den 22 Probanden trat lediglich bei einem Übelkeit auf, was 4.55% entsprach. Er verspürte jedoch keinen Schwindel bei dieser Stimulationsart.

Während der Sham-Messung empfanden lediglich zwei Probanden Schwindel, dies entsprach 9.09%. Diese zwei Probanden gaben, auf einer im Vergleich zum Fragebogen nach der GVS gleich aufgebauten numerischen Rating-Skala, durchschnittlich eine Stärke von 5 ($SD = \pm 4.24$) an. Der Schwindel trat im Mittel nach 3.5 Minuten ($SD = \pm 4.95$) auf und dauerte durchschnittlich 3.5 Minuten ($SD = \pm 2.12$). Drei der 22 Probanden (13.64%) spürten eine Veränderung am Körper, die als unscharfes Sehen, Druck auf den Nebenhöhlen oder Hitze im Bereich des Ohres angegeben wurde. Einer dieser Probanden verspürte ebenfalls Schwindel und Übelkeit, ansonsten trat bei keinem Übelkeit auf. Keiner der Probanden verspürte sowohl bei der GVS als auch bei der Sham-Messung Schwindel.

4.2.2. Experiment 1

Der für die GVS durchschnittlich ermittelte Schwellenwert betrug 0.41 mA (\pm 0.22mA SD). Die Stromstärke, bei der stimuliert wurde, und die 95% des Schwellenwertes entsprach, betrug im Durchschnitt 0.38 mA (SD= \pm 0.21 mA). Nach der Analyse der 22 Versuchspersonen, die das Experiment der GVS absolvierten, zeigte sich in der zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung, die die beiden Seiten (also BPI Arm und Bein der rechten Seite, mit BPI Arm und Bein der linken Seite) und die Versuchsdurchläufe (sprich Prä-Messung, Stimulation und Sham-Messung) miteinander verglich, eine signifikante Veränderung der Körperrepräsentation beim Vergleich der Seiten miteinander $F(1.21)=7.72$, $p < .05$. Hierbei wurde eine Korrektur nach Greenhouse-Geisser angewendet, da die Sphärizität unbekannt war. Als Signifikanzniveau wurde, wie auch im Rest der Auswertung, ein nach der Bonferroni-Korrektur modifiziertes Niveau verwendet.

Der Vergleich der Messbedingungen untereinander ergab keine signifikante Veränderung $F(2.32)= 0.39$, $p = .63$. Hierbei wurde aufgrund der Ablehnung der Sphärizität eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser vorgenommen.

Um zu untersuchen, wo genau sich die signifikante Veränderung befand und ob sie auch bei weiteren, genaueren Analysen auftrat, wurde die in der Methodik beschriebene einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung, getrennt für die rechte und die linke Seite durchgeführt.

4.2.2.1. Linke Seite

Hierbei zeigten sich für die linke Seite keine signifikante Veränderung während der einzelnen Messbedingungen $F(2.32)=0.29$, $p = .69$, bei einer Korrektur der Freiheitsgrad nach Greenhouse-Geisser aufgrund der abgelehnten Sphärizität. Bei weiterer Analyse der Werte der linken Seite mit einem t-Test, der die Mittelwerte der einzelnen Messbedingungen untereinander verglich, zeigte sich sowohl für den Vergleich von Prä-Messung mit GVS $t(21)=-0.48$, $p = .64$, den Vergleich der GVS mit der Sham Messung $t(21)=1.13$, $p = .27$, als auch für den Vergleich der Sham- mit der Prä-Messung $t(21)=-0.19$, $p = .85$ keine signifikanten Veränderung zwischen den einzelnen Messbedingungen. Daraus

lässt sich schließen, dass die GVS keinen Einfluss auf die Körperrepräsentation der Extremitäten der linken Seite hatte.

4.2.2.2. Rechte Seite

Analog dazu fanden sich auch bei der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung der rechten Seite keine signifikanten Veränderungen der BPI-Werte zwischen den drei Messbedingungen $F(2,42)=0.47$, $p= .63$. Dies bestätigte sich im t-Test, der die Mittelwerte der verschiedenen Messbedingungen auf der rechten Seite miteinander verglich. Hierbei zeigte sich weder für den Vergleich der Prä-Messung mit der GVS $t(21)=-0.43$, $p= .67$, den Vergleich der GVS mit der Sham-Messung $t(21)=1.34$, $p= .19$, noch für den Vergleich der Sham- mit der Prä-Messung $t(21)=-0.44$, $p= .66$ eine signifikante Veränderung innerhalb der untersuchten Messbedingungen. Daraus lässt sich schließen, dass auch auf der rechten Seite die GVS keinen Einfluss auf die Körperrepräsentation der Extremitäten hatte.

4.2.2.3. Vergleich rechte Seite mit linker Seite

Des Weiteren wurde ein t-Test durchgeführt, der die beiden Seiten während den einzelnen Messbedingungen miteinander verglich. Dabei zeigte sich beim Vergleich der Seiten miteinander während der Prä-Messung ein signifikanter Unterschied der Messwerte $t(21)=-2.62$, $p< .05$, hierbei war der Mittelwert der rechten Seite größer. Auch während der Sham-Messung $t(21)=-2.62$, $p< .05$ bestand ein signifikanter Unterschied, wobei auch hier der Mittelwert der rechten Seite größer war. Jedoch ließen sich während der GVS keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Körperseiten erkennen $t(21)=-2.19$, $p= .04$. Dieses Ergebnis ist anders als erwartet, da logischerweise davon auszugehen wäre, dass beide Seiten gleich gut eingeschätzt werden, und, falls es eine Veränderung während der GVS gäbe, diese einseitig auftritt und somit hier ein signifikanter Unterschied der BPI-Werte bei den t-Tests auftreten würde. In *Tabelle 1* lässt sich jedoch erkennen, dass die Unterschiede zwischen den beiden Seiten, die als signifikant gelten, nur geringe Unterschiede der BPI-Werte darstellen, weswegen ich sie als Artefakt beschreiben würde.

Tabelle 1. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung von Experiment eins während der einzelnen Messbedingungen für beide Seiten getrennt. **A** linke Seite, **B** rechte Seite

	N	Mittelwert	Standardabweichung
BPI linke Seite Prä-Messung	22	114.38	11.28
BPI linke Seite GVS	22	115.04	13.40
BPI linke Seite Sham-Messung	22	114.11	14.32
A			
	N	Mittelwert	Standardabweichung
BPI rechte Seite Prä-Messung	22	116.12	9.83
BPI rechte Seite GVS	22	116.69	11.80
BPI rechte Seite Sham-Messung	22	115.52	13.19
B			

4.2.2.4. Diagramme

Die durch die statistische Auswertung gefundenen Erkenntnisse, wurden durch folgende Diagramme bestätigt. In *Abbildung 4* ist zu erkennen, dass, bis auf leichte Schwankungen und vereinzelte Ausreißer einiger Probanden, während der verschiedenen Messbedingungen kein allgemeiner Trend erkennbar war, weder für die Extremitäten der rechten noch der linken Seite. Zu dem gleichen Ergebnis kommt man bei Betrachtung von *Abbildung 5*. Hier wurden die Werte weiter zusammengefasst, indem die Mittelwerte der BPI-Werte aller Teilnehmer für jede Messbedingung betrachtet wurden. Falls sich während der GVS Veränderungen in der Messgenauigkeit und somit der Körperrepräsentation gezeigt hätten, würde sich dies in einem Ausschlag der entsprechenden Werte zeigen, was jedoch nicht der Fall war. In *Abbildung 6* wurden die Werte der einzelnen Probanden nicht mehr getrennt beobachtet, sondern zusammengefasst. Hier zeigt sich, dass, wie bereits in den vorangegangenen Diagrammen, keine Veränderung der Körperrepräsentation während der GVS oder der Sham-Messung vorhanden war, weder für die rechte, noch für die linke Seite.

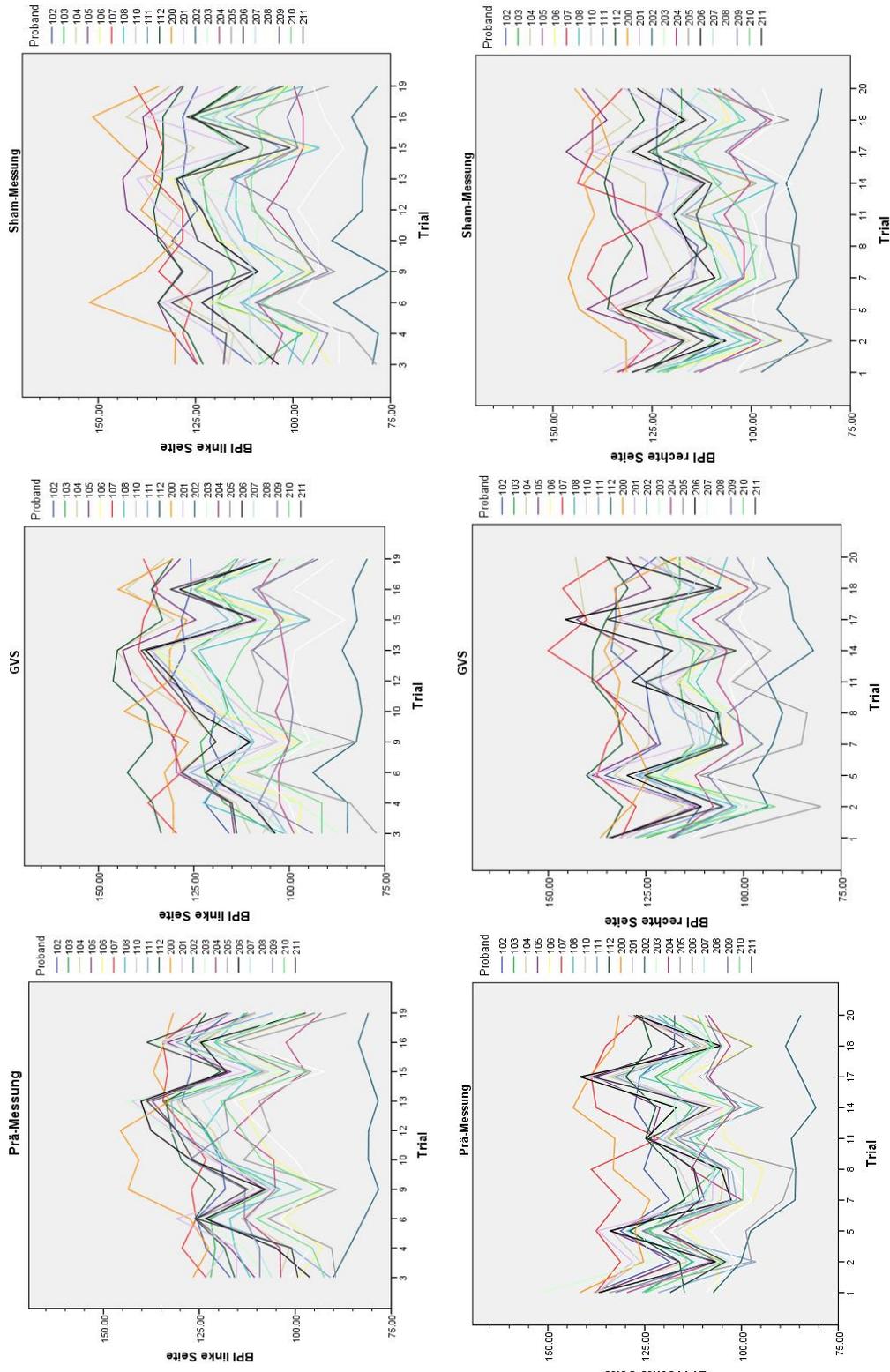


Abbildung 4. BPI-Werte in Abhängigkeit der einzelnen Trials. Seiten getrennt betrachtet (1.Zeile links, 2. Zeile rechts). Jede Linie repräsentiert einen Probanden

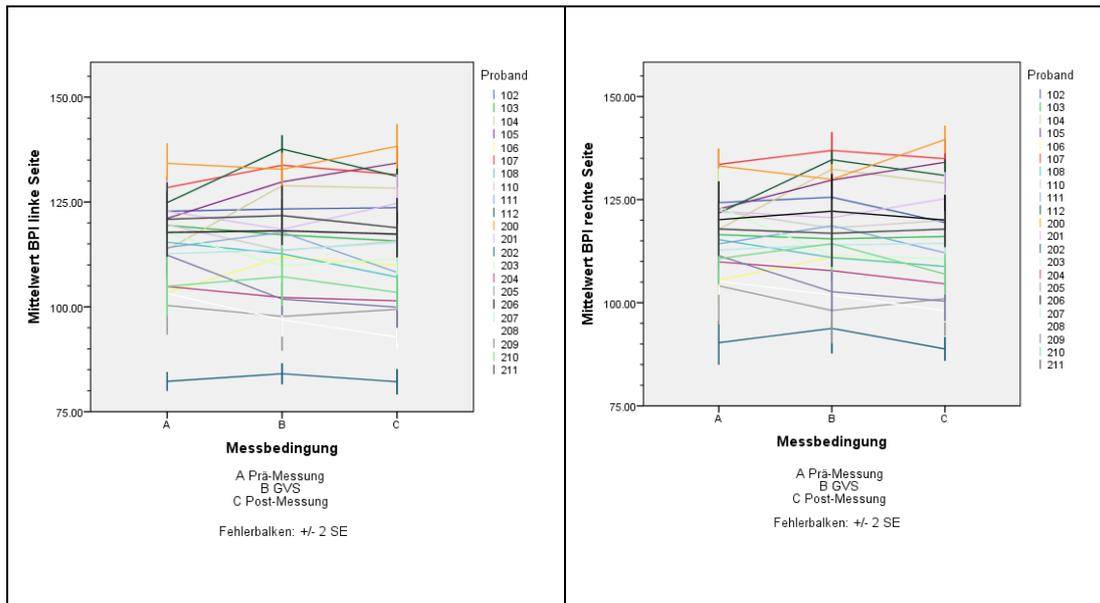


Abbildung 5. Mittelwerte der BPI-Werte in Abhängigkeit von der Messbedingung. Seiten getrennt betrachtet. Jede Linie repräsentiert einen Versuchsteilnehmer.

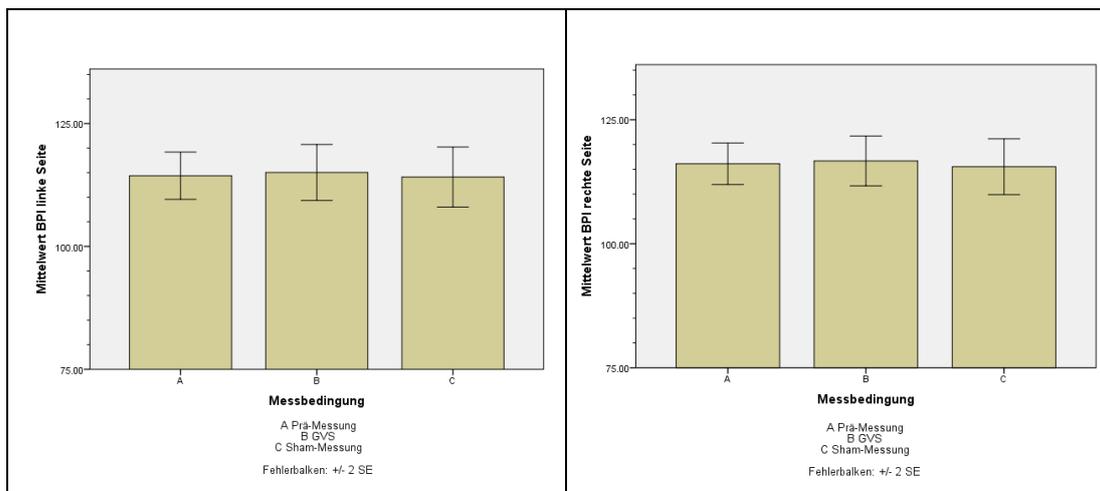


Abbildung 6. Mittelwert der BPI-Werte in Abhängigkeit von der Messbedingung. Seiten getrennt betrachtet.

Aus den Varianzanalysen und der Betrachtung der Diagramme, lässt sich somit übereinstimmend ableiten, dass die GVS keinen signifikanten Effekt auf die Körperrepräsentation hatte. Während der GVS blieb die Messgenauigkeit im Vergleich zur Prä-Messung und zur Sham-Messung im Mittel gleich, dies traf sowohl für die Extremitäten der linken als auch der rechten Seite zu.

4.3. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation

4.3.1. Fragebögen

Von den 21 Probanden, die das Experiment unter CVS absolvierten, verspürten während der Stimulation alle Schwindel. Dieser trat im Mittel nach 0.11 Minuten ($SD=\pm 0.17$) ein und hielt im Durchschnitt 3.05 Minuten ($SD=\pm 1.34$) an. Der Schwindel entsprach auf der Numerischen Rating-Skala im Mittel einem Wert von 7.95 ($SD=\pm 1.47$). Hierbei entsprach, analog zu den Fragebögen bei der GVS, null keinem Schwindel und zehn sehr starkem Schwindel. Eine Veränderung am Körper wurde bei zehn Probanden empfunden, dies entsprach 47.62%. Zwei Probanden empfanden Kopfschmerzen, zwei Wahrnehmungsschwierigkeiten. Des Weiteren wurde Druck im gespülten Ohr, ein schwankendes Sichtfeld, Tinnitus, Konzentrationsprobleme sowie ein Schweißausbruch bzw. kalter Schauer an Armen und Beinen beschrieben. 13 der 21 Probanden empfanden außerdem Übelkeit, was 61.90% entspricht.

4.3.2. Experiment 2

Bei der Auswertung der Daten die während der CVS erhoben wurden, wurden nur jene Durchgänge analysiert, während denen von den Probanden subjektiv Schwindel empfunden wurde. Dies entsprach je nach Proband mindestens 4, maximal 10 Durchgängen ($M=7.62, \pm 1.88$ SD).

Bei der zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung, die die BPI-Werte der Messbedingungen (Prä-Messungen, Stimulation und Post-Messung) und die BPI-Werte der beiden gemessenen Körperseiten miteinander verglich, zeigte sich beim Vergleich der Messbedingungen keine signifikante Veränderung der Messgenauigkeit $F(2.40)=2.28, p= .12$. Jedoch erwies sich, beim Vergleich der BPI-Werte beider Seiten miteinander ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten der beiden Seiten $F(1.20)=10.41, p< .01$. Um diese Veränderung genauer zu lokalisieren, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt, die die Messbedingungen miteinander verglich und zwar für jede Seite getrennt.

4.3.2.1. Rechte Seite

Bei der Analyse der rechten Seite wurde keine signifikante Veränderung innerhalb der Messbedingungen ermittelt $F(2,40)= 2.55$, $p= .09$. Beim zusätzlich durchgeführten t-Test, der die Mittelwerte der rechten Seite der einzelnen Messbedingungen miteinander verglich, zeigte sich ein ähnliches Ergebnis. Hierbei waren sowohl beim Vergleich der Prä-Messung mit der CVS $t(20)=-1.89$, $p= .07$, beim Vergleich der CVS mit der Post-Messung $t(20)=0.18$, $p= .86$ als auch beim Vergleich der Post- und der Prä-Messung $t(20)=2.12$, $p= .05$ keine signifikanten Veränderungen zu erkennen. Aus den gemachten Analysen lässt sich ableiten, dass die CVS keinen Einfluss auf die Körperrepräsentation der Extremitäten der rechten Seite hatte.

4.3.2.2. Linke Seite

Bei der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung für die linke Seite zeigte sich eine signifikante Veränderung der Messgenauigkeit während der verschiedenen Messbedingungen $F(2,40)=6.30$, $p< .01$. Um genauer zu lokalisieren, zwischen welchen Messbedingungen sich der Effekt auf der linken Seite befand, wurde auch hier ein t-Test durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass sich die Messgenauigkeit beim Vergleich der Prä-Messung mit der CVS nicht signifikant veränderte $t(20)=2.16$, $p= .04$. Ebenso gab es keine signifikante Veränderung der Messgenauigkeit beim Vergleich der BPI-Werte der Post- mit der Prä-Messung $t(20)=1.77$, $p= .09$. Jedoch ließ sich durch den t-Test zeigen, dass eine signifikante Veränderung der Messgenauigkeit auf der linken Seite zwischen der CVS und der Post-Messung vorhanden war $t(20)=-3.04$, $p< .01$, wobei der Mittelwert der Post-Messung deutlich größer war. Das lässt sich möglicherweise als Effekt der CVS auf die Messgenauigkeit der Extremitäten der linken Seite deuten. Bei Betrachtung der Mittelwerte in *Tabelle 2* zeigt sich, dass der Mittelwert der Post-Messung höher ist als der Mittelwert während der Prä-Messung, woraus sich erklären lässt, warum der signifikante Effekt zwischen CVS und Post-Messung auftrat.

4.3.2.3. Vergleich rechte Seite mit linker Seite

Bei Durchführung eines t-Tests, der die Mittelwerte der BPI-Werte beider Seiten während der einzelnen Messbedingungen verglich, zeigte sich weder beim

Vergleich der beiden Seiten während der Prä-Messung $t(20)=-0.78$, $p= .45$, noch während der Post-Messung $t(20)=-1.06$, $p= .30$ ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Seiten. Jedoch wurde während der CVS ein signifikanter Unterschied zwischen den Messwerten der beiden Seiten festgestellt $t(20)=-5.25$, $p < .001$, wobei der Mittelwert der rechten Seite größer war. Daraus lässt sich möglicherweise ableiten, dass die CVS einen Effekt auf die Körperrepräsentation hatte, der einseitig auftrat. Bei Betrachtung der Mittelwerte in *Tabelle 2*, lässt sich sehen, dass dieser Effekt linksseitig auftrat.

Tabelle 2. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung von Experiment zwei während der einzelnen Messbedingungen für beide Seiten getrennt. **A**=linke Seite, **B**=rechte Seite

	N	Mittelwert	Standardabweichung
BPI linke Seite Prä-Messung	21	113.22	13.91
BPI linke Seite CVS	21	110.89	14.38
BPI linke Seite Post-Messung	21	115.15	15.79
A			
	N	Mittelwert	Standardabweichung
BPI rechte Seite Prä-Messung	21	113.77	12.03
BPI rechte Seite CVS	21	115.97	13.34
BPI rechte Seite Post-Messung	21	115.77	14.36
B			

4.3.2.4. Diagramme

Bei Betrachtung der Diagramme in *Abbildung 7* war es schwierig, einen allgemeinen Trend der BPI-Werte der Versuchsteilnehmer zu erkennen. Aufgrund der Übersichtlichkeit wurden die Werte in *Abbildung 8* weiter zusammengefasst. Hierbei zeigte sich, dass auf der linken Seite bei vielen Teilnehmern ein Knick nach unten während der CVS festzustellen war. Das bedeutet, dass bei diesen Probanden während der CVS die gemessenen BPI-Werte nach unten abwichen, folglich wurden während der CVS die Extremitäten der linken Körperseite kürzer eingeschätzt. Auf der rechten Seite zeigte sich kein offensichtlicher Trend der BPI-Werte nach unten während der CVS. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen der statistischen Auswertung der Werte. In *Abbildung 9*, die die Mittelwerte aller Probanden

zusammengefasst, somit auch die Werte jener Probanden, welche in *Abbildung 8* auf der linken Seite keinen Trend nach unten während der CVS zeigten, ließ sich ebenfalls erkennen, dass während der CVS die Extremitäten der linken Körperhälfte kürzer wahrgenommen wurden, insbesondere im Vergleich zu Post-Messung. Auf der rechten Seite war auch hier kein Ausschlag nach unten während der CVS zu erkennen.

Aus den Varianzanalysen und der Betrachtung der Diagramme lässt sich erkennen, dass die CVS einen Effekt auf die Körperrepräsentation der linken Seite hatte, welcher im Vergleich zur Post-Messung signifikant ist.

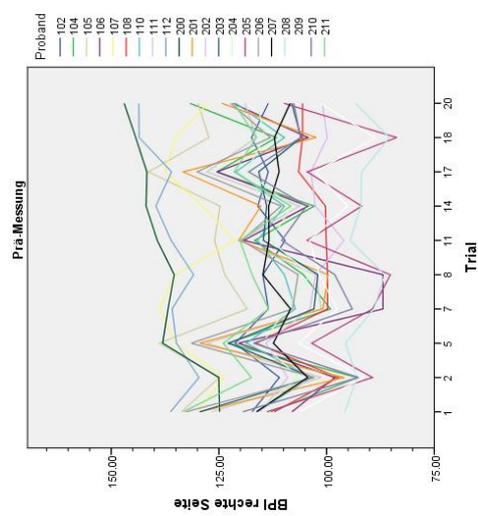
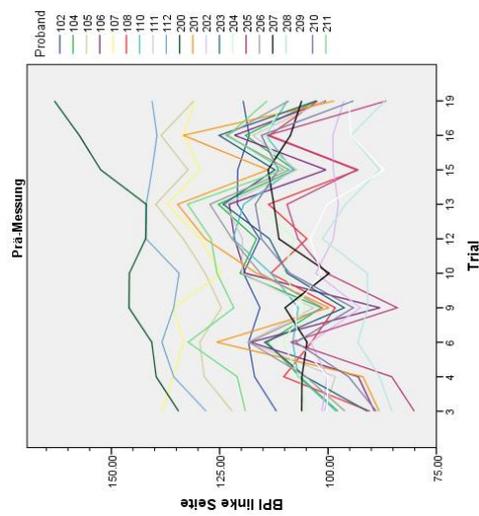
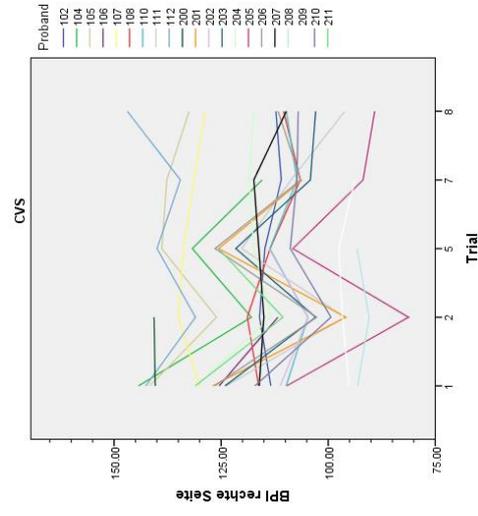
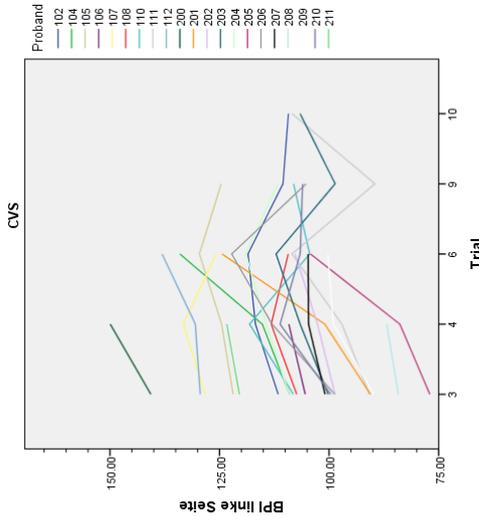
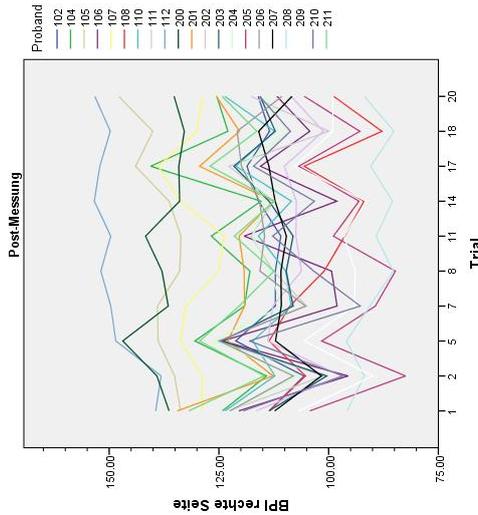
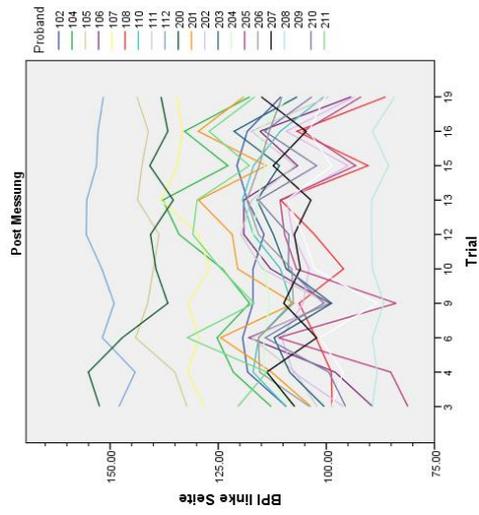


Abbildung 7. BPI-Werte in Abhängigkeit von den einzelnen Trials. Seiten getrennt betrachtet (1.Zeile links, 2. Zeile rechts). Jede Linie repräsentiert einen Versuchsteilnehmer.

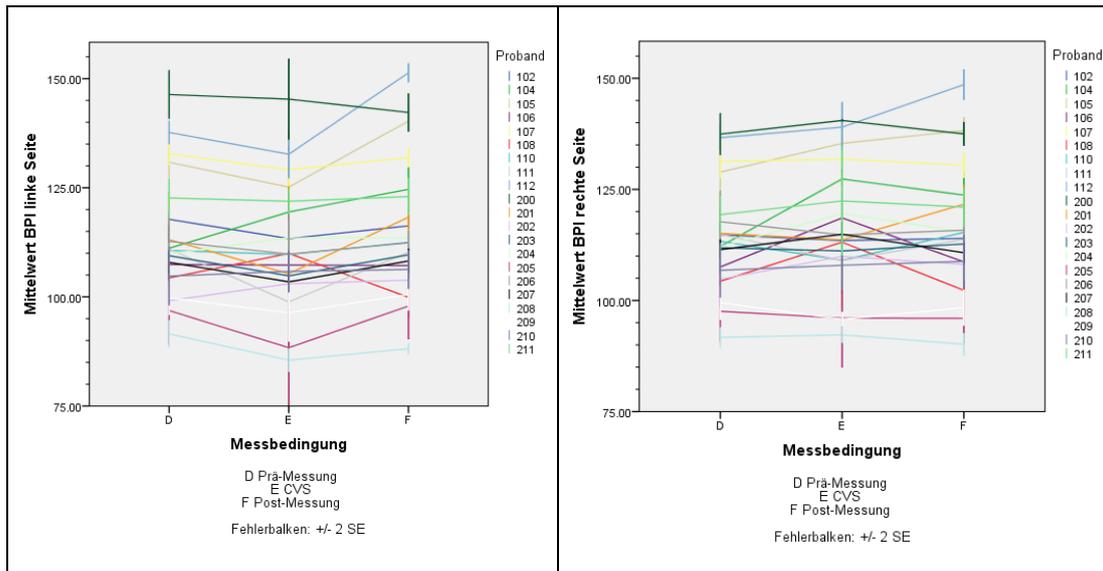


Abbildung 8. Mittelwerte der BPI-Werte in Abhängigkeit von der Messbedingung. Seiten getrennt betrachtet. Jede Linie repräsentiert einen Versuchsteilnehmer.

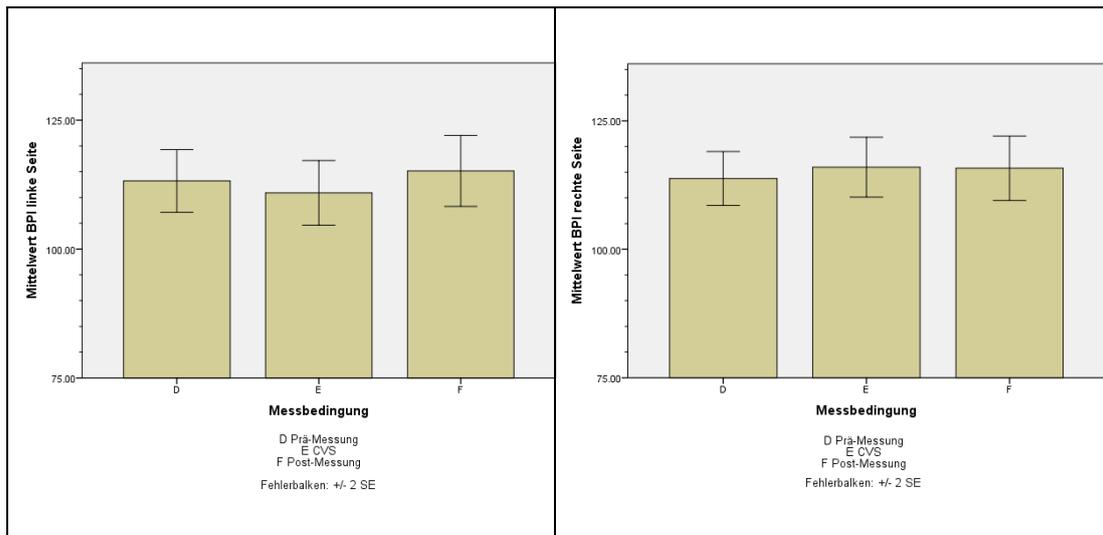


Abbildung 9. Mittelwert der BPI-Werte in Abhängigkeit von der Messbedingung. Seiten getrennt betrachtet.

4.3.3. Fragebogen zum Hospital Stroke Programm

4.3.3.1. Qualität der Simulation

Bei dem nach der CVS ausgefüllten Fragebogen, der sich auf beide Experimente bezog, wurden die 21 Probanden, die ihn beantworteten, zunächst dazu befragt, wie ähnlich ihnen der Avatar war, den sie durch die Brille gesehen

haben. Bei den folgenden Antworten entspricht eins der Einschätzung „gar nicht“ und sieben der Einschätzung „sehr“. In Bezug auf den Gesamteindruck wurde im Mittel mit 4.38 geantwortet ($SD=\pm 1.50$). Bezüglich der Figur (beispielsweise deren Proportionen) antworteten die Probanden im Durchschnitt mit 4.57 ($SD=\pm 1.63$). In Hinblick auf das Aussehen, sprich, ob der Avatar wie der Proband ausgesehen hat, wurde im Mittel mit 3.81 ($SD=\pm 1.60$) geantwortet. Anschließend bezog sich die Befragung auf bestimmte Körperteile. Die Arme betreffend, wurde durchschnittlich mit 4.86 ($SD=\pm 1.42$) geantwortet. Die Beine betrachtend, gaben die Probanden eine Antwort mit dem Mittelwert von 4.81 ($SD=\pm 1.54$) und in Bezug auf den Oberkörper wurde im Durchschnitt eine Antwort von 3.57 ($SD=\pm 1.78$) gewählt.

Auf die Frage, ob das Bild die Probanden selbst in einer virtuellen Umgebung repräsentiere, antworteten acht mit „ja“, was 38.10% entsprach, neun mit „nein“, dies waren 42.86% und vier mit „teilweise“, also 19.05% der Befragten. Eine weitere Frage des Fragebogens bezog sich darauf, ob der Avatar oder Teile von ihm auf den Probanden seltsam oder unheimlich gewirkt hätten. Diese Frage wurde von sieben Teilnehmern, sprich 33.33% verneint. Fünf der Befragten gaben an, dass die Arme auf sie einen seltsamen Eindruck machten, was 23.81 entspricht. Drei (=14.29%) gaben als Antwort die Beine an und fünf, sprich 23.81%, den Oberkörper. Des Weiteren antwortete einer (4.76%), dass sowohl Arme als auch Beine auf ihn seltsam oder unheimlich gewirkt hätten.

4.3.3.2. Lösungsstrategien

Auf die Frage, welche Lösungsstrategien verwendet wurden, wurde von elf Probanden genannt, dass sie versuchten, den Avatar ihrem Körpergefühl anzupassen, dies entspricht 52.38% der Befragten. Vier der Probanden, sprich 19.05%, gaben an, dass sie versuchten, sich an die Länge ihrer Extremitäten zu erinnern. Drei Probanden antworteten, die Aufgaben gemeistert zu haben, indem sie sich mit dem virtuellen Bild identifiziert hätten, dies entspricht 14.29% der Befragten. Ebenfalls drei Probanden gaben an, sich an anderen Körperteilen orientiert zu haben, also 14.29%. Insgesamt vier Probanden wählten zuzüglich zur ersten Antwort eine zweite. Dabei gaben drei als zweite Lösungsstrategie an, sich an anderen Körperteilen orientiert zu haben und einer

gab als Zweitantwort an, sich am Fußende des Bettes, in dem der Proband während des Versuches lag, orientiert zu haben.

4.4. Gegenüberstellung Experiment 1 und Experiment 2

4.4.1. Diagramme

Um die gemachten Erkenntnisse zu verifizieren, wurden die BPI-Werte der einzelnen Experimente gegenübergestellt. In *Abbildung 10* zeigte sich bei Betrachtung der Extremitäten der linken Seite, dass ein Abweichen der Werte nach unten nur während der CVS zu sehen war. Während der GVS oder der anschließenden Sham-Messung war kein derartiger Trend zu beobachten. Für die Extremitäten der rechten Seite war weder während der GVS oder Sham-Messung noch während der CVS ein eindeutiger Trend in eine Richtung zu erkennen.

4.4.1.1. Linke Seite

In *Abbildung 11*, die die zusammengefassten Werte beider Experimente in einem Liniendiagramm vereint, zeigt sich im Experiment 2 bei Betrachtung der linken Seite während der CVS eine deutliche Verringerung der Messwerte. Dies steht im Gegensatz zu den Werten aus Experiment 1, da sich hier während der GVS keine erkennbare Veränderung der Messgenauigkeit im Vergleich zu Prä- oder Sham-Messung zeigte. Gleiches lässt sich auch bei Betrachtung der Mittelwerte in *Tabelle 3* erkennen.

4.4.1.2. Rechte Seite

Auf der rechten Seite zeigte sich bei Experiment 1 während der GVS nahezu keine Veränderungen der BPI-Werte im Vergleich zu den anderen beiden Messbedingungen. Während Experiment 2 zeigte sich, dass während der Prä-Messung die Extremitäten im Vergleich zu CVS und Post-Messung durchschnittlich etwas kürzer eingeschätzt wurden. Diese Abweichung entspricht jedoch, wie sich in *Tabelle 3* zeigt, nur einem BPI-Wert von 2 und ist, wie im t-Test festgestellt wurde, nicht signifikant.

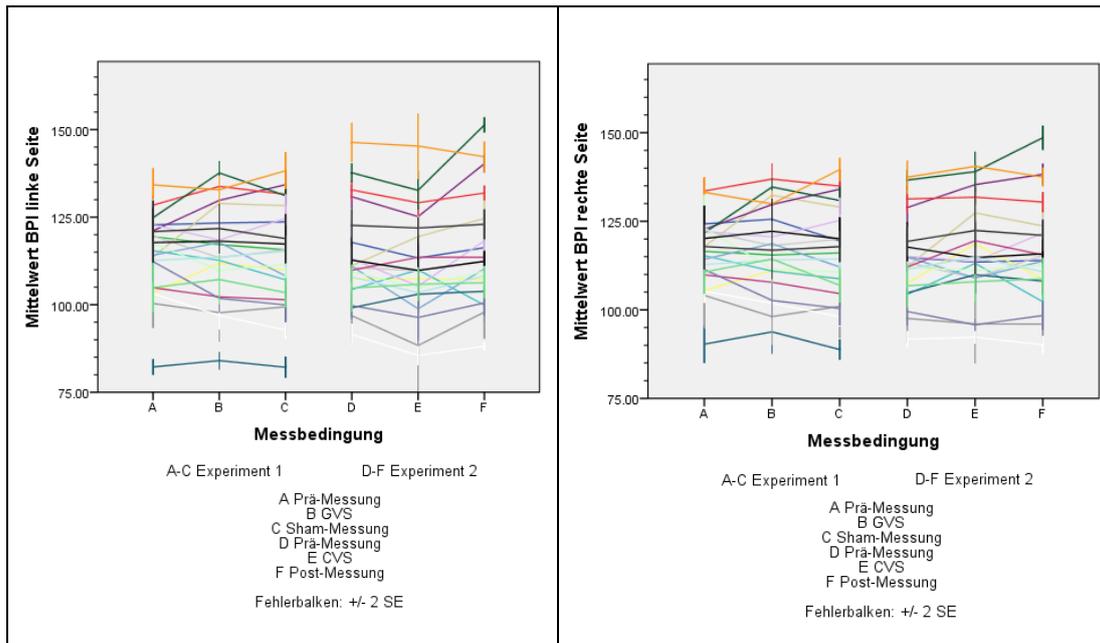


Abbildung 10. Mittelwert der BPI-Werte in Abhängigkeit von der Messbedingung. Beide Experimente in einem Diagramm. Seiten getrennt betrachtet. Jede Linie repräsentiert einen Versuchsteilnehmer.

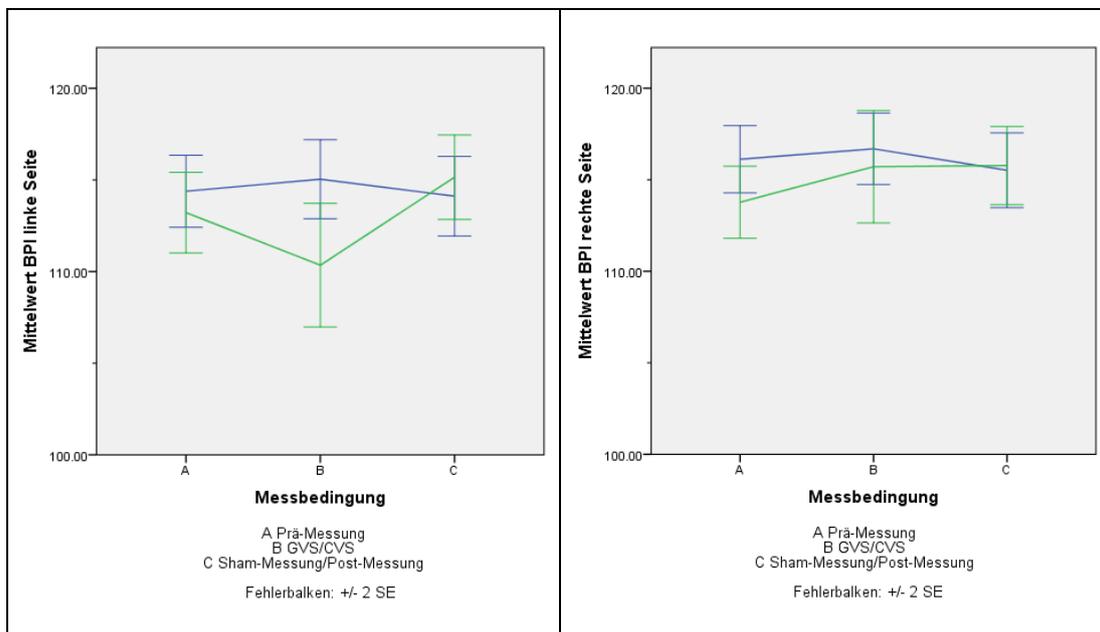


Abbildung 11. Mittelwert der BPI-Werte in Abhängigkeit der Messbedingung. Jede Linie repräsentiert ein Experiment: blau Experiment 1 (GVS), grün Experiment 2 (CVS). Seiten getrennt betrachtet.

Tabelle 3. Gegenüberstellung der Mittelwerte von Experiment 1 und Experiment 2.

A Experiment 1 linke Seite, **B** Experiment 2 linke Seite

	N	M	SD		N	M	SD		
BPI linke Seite Prä-Messung	22	114.38	11.28	A	BPI linke Seite Prä-Messung	21	113.22	13.91	
BPI linke Seite GVS	22	115.04	13.40		BPI linke Seite CVS	21	110.89	14.38	
BPI linke Seite Sham-Messung	22	114.11	14.32		BPI linke Seite Post-Messung	21	115.15	15.79	
				B					
BPI rechte Seite Prä- Messung	22	116.12	9.83		BPI rechte Seite Prä- Messung	21	113.77	12.03	
BPI rechte Seite GVS	22	116.69	11.80		BPI rechte Seite CVS	21	115.97	13.34	
BPI rechte Seite Sham- Messung	22	115.52	13.19	BPI rechte Seite Post- Messung	21	115.77	14.36		
				C					
					D				

4.5. Zusammenfassung

Die Analyse der Ergebnisse von Experiment 1 ergab folglich, dass durch die GVS keine Veränderung der Körperrepräsentation der Extremitäten ausgelöst wurde. Bei Experiment 2 ließ sich ein möglicher Effekt der CVS auf die Körperrepräsentation der Extremitäten feststellen. Die Länge der Extremitäten der linken Seite während der CVS wurden als kürzer eingeschätzt. Dieser Effekt trat allerdings nur im Vergleich der CVS mit der Post-Messung auf.

5. Diskussion

5.1. Hauptfragestellung

Die Studie hat untersucht, ob die Stimulation des Vestibularorgans durch GVS und CVS auf visueller Ebene Einfluss auf die Körperrepräsentation der Arm- und Beinlänge des Menschen hat, und ob dabei unterschiedliche Effekte durch GVS und CVS auftreten. In Experiment 1 konnte durch GVS keine signifikanten

Effekte beobachtet werden, die Länge der Extremitäten wurden auf beiden Seiten im Mittel gleich eingeschätzt, es gab keinen Unterschied zwischen Prä-Messung, GVS und Post-Messung. In Experiment 2 hingegen konnte durch CVS eine signifikante Veränderung festgestellt werden, hierbei wurden die Extremitäten der linken Seite im Vergleich zur Post-Messung kürzer wahrgenommen, dies muss jedoch als Artefakt gewertet werden. Obwohl aufgrund der Studienlage auch bei unserer Studie ein Effekt zu erwarten gewesen wäre, war dies nicht der Fall und wir stellten nach Auswertung der Ergebnisse der beiden Experimente fest, dass insgesamt die Genauigkeit der Einschätzung der Arm- und Beinlänge sehr robust gegenüber äußeren Einflüssen ist.

5.2. Repräsentativität der Stichprobe

Die rekrutierte Stichprobe wurde von uns, unter vielen Gesichtspunkten, als repräsentativ eingestuft, in einigen Gesichtspunkten müssen wir die Repräsentativität jedoch kritischer betrachten. In der Studie wurden 21 bzw. 22 Probanden untersucht, die gesunde Studenten im jungen Erwachsenenalter waren. Anhand der errechneten Teststärke lässt sich sehen, dass die Stichprobe genügend groß war, um einen möglichen vorhandenen signifikanten Effekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% zu finden. Da in der Stichprobe ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Männern und Frauen vorherrschte, lässt sich das Ergebnis auf beide Geschlechter übertragen. Bei unserer Studie wurden ausschließlich gesunde junge Erwachsene untersucht, sie hatten weder neurologische Erkrankung, eine Beeinträchtigung des Vestibularorgans noch andere Grunderkrankungen oder Einschränkungen, weswegen man davon ausgehen kann, dass die Ergebnisse nicht von diesen Einflussfaktoren verfälscht wurden. Bei älteren Patienten oder Neglect Patienten hingegen muss davon ausgegangen werden, dass sie zusätzlich unter anderen Erkrankungen leiden, welche möglicherweise die Messergebnisse beeinflussen. Folglich können die Ergebnisse unserer Studie zwar auf andere gesunde Probanden übertragen werden, jedoch nicht generell auf ältere Personen oder Neglect Patienten, da hier eine differenziertere Betrachtung und womöglich weitere Studien notwendig sind.

5.3. Einordnung der Studie

Wenn man versucht unser Experiment in die verschiedenen Stufen der somatosensorischen Kognition nach Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) einzusortieren, ist dies nicht mit Sicherheit möglich. Je nachdem, welche Lösungsstrategien der Proband angewandt hat, wurden verschiedene Ebenen untersucht. Hat ein Proband die Aufgabe gelöst, indem er versucht hat, den Avatar seinem Körpergefühl anzupassen, wurden sensorische Informationen seines Körpers genutzt um sie auf den visuell wahrgenommenen Avatar zu übertragen, dies entspricht am ehesten der Somatoperception. Hat ein Proband jedoch versucht, durch die Erinnerung an die Länge seiner Extremitäten die Aufgabe zu meistern, wurde bei dem Experiment eher die Somatorepräsentation untersucht. Zudem gibt es auch Mischformen: Hat ein Proband versucht, sich mit dem virtuellen Bild zu identifizieren, um die Aufgabe zu lösen, wurden zum einen somatosensorische Informationen dazu verwendet, um den Avatar anzupassen, was der Somatoperception entspricht, zum anderen wurde ein bereits gespeichertes Bild von seinem Körper verwendet, um es mit dem Avatar abzugleichen und sich damit zu identifizieren, was der Somatorepräsentation entspricht. Somit lässt sich hier keine generelle Einstufung unseres Experiments vornehmen. Zudem gibt es, wie bereits erwähnt, bereits neuere Definitionen, die die Körperrepräsentation in sechs Unterpunkte einteilen (Longo, 2016). Dies macht eine Zuordnung unserer Studie in die verschiedenen Stufen jedoch nicht leichter, sondern eher schwerer, weswegen wir es unterlassen und uns nun der Interpretation der Ergebnisse widmen.

5.4. Experiment 1: Galvanische vestibuläre Stimulation

5.4.1. Ergebnisse

Bei der Untersuchung des Einflusses der GVS auf die Körperrepräsentation der Arm- und Beinlängen konnte keine signifikante Veränderung der Einschätzung der Länge der Arme und Beine gefunden werden. Auf der linken Seite zeigte sich während den einzelnen Versuchsdurchläufen von Experiment 1 keine signifikante Veränderung der Schätzung der Länge der Extremitäten. Ebenso

konnte auch bei Betrachtung der rechten Seite während der Versuchsdurchläufe keine signifikante Veränderung der Einschätzung der Länge von Armen und Beinen festgestellt werden. Diese Ergebnisse sollen im Folgenden mit bisherigen Forschungserkenntnissen verglichen werden.

5.4.2. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien

Vergleicht man die Ergebnisse von Experiment 1 mit den Ergebnissen ähnlicher Studien, zeigen sich je nach Versuchsaufbau unterschiedliche Ergebnisse.

5.4.2.1. Untersuchung der taktilen Wahrnehmung

Ferrè, Day, *et al.*, (2013) beobachteten durch L-GVS eine Verbesserung der taktilen Wahrnehmung der Finger beider Hände, wobei während der Stimulation mehr taktile Reize wahrgenommen wurden. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu dem gefundenen Ergebnis in Experiment 1, bei dem kein Effekt der L-GVS beobachtet wurde. Da in der beschriebenen Studie die taktile Wahrnehmung untersucht wurde, unsere Studie sich jedoch auf die Längenwahrnehmung der Extremitäten bezog, würde man nicht zwingend gleiche bzw. ähnliche Ergebnisse erwarten, da die Aufgabenstellung recht verschieden war, weswegen weitere Studien zum Vergleich herangezogen werden müssen.

5.4.2.2. Untersuchung der taktilen Lokalisation

Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) untersuchten die Lokalisationsfähigkeit von Stimuli. In ihrem Experiment mussten Probanden taktile Stimuli an der Hand lokalisieren. Dabei zeigte sich, dass unter GVS Stimuli am Handrücken als nach proximal verschoben, Stimuli an den Fingern als nach distal verschoben wahrgenommen wurden. Dies wurde von Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) als durch vestibuläre Stimulation ausgelöste taktile Ausdehnung interpretiert, die die Lokalisation von Stimuli auf der Oberfläche des Körpers betrifft. Eine derartige Schnittstelle beschreiben sie auch auf anatomischer Ebene, nämlich im Bereich der vestibulären kortikalen Areale und der Areale, welche für die taktile Lokalisation zuständig sind. Auch diese Ergebnisse unterscheiden sich mit den in Experiment 1 gewonnen Erkenntnissen, da in unserer Studie die GVS keine Effekte zeigte, dies lässt sich aber womöglich dadurch erklären,

dass in der genannten Studie taktile Stimuli zur Untersuchung der Körperrepräsentation herangezogen wurden, wohingegen wir als Untersuchungsmethode die visuelle Modifikation herangezogen haben.

5.4.2.3. Untersuchung Lokalisation anatomischer Landmarken

Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) führten in der genannten Studie noch ein weiteres Experiment durch: Hierbei forderten sie die Probanden dazu auf, Landmarken auf ihrem linken Handrücken mithilfe der rechten Hand zu lokalisieren, während, wie bei unserem Experiment, durch eine Platzierung der Anode auf dem linken Mastoid und der Kathode auf dem rechten (L-GVS) stimuliert wurde, was zur Anregung der rechten Hemisphäre führte. Zudem wurde durch eine Platzierung der Anode auf dem rechten Mastoid und der Kathode auf dem linken (R-GVS) die linke Hemisphäre stimuliert. Dabei beobachteten Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) keine signifikanten Veränderungen: weder beim Vergleich der gemittelten Werte von L-GVS und R-GVS zur Sham-Messung, noch beim Vergleich der Werte beider Stimulationsarten miteinander. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus unserem Experiment 1, da auch dort kein signifikanter Effekt beobachtet werden konnte. Da neben der L-GVS, welche auch bei unserem Experiment verwendet wurde, ebenfalls eine R-GVS durchgeführt wurde, und beim Vergleich der Messergebnisse beider Stimulationsarten miteinander keine signifikante Veränderung der Größenwahrnehmung der Hand auftrat, könnte man schlussfolgern, dass auch bei unserem Experiment eine Stimulation durch R-GVS nicht zu einem signifikanten Ergebnis geführt hätte. Ferrè, Vagnoni und Haggard (2013) beschreiben die Wahrnehmung der Größe der Hand als stabil, womit man erklären kann, dass es durch GVS weder in ihrem Experiment, noch bei unserem Experiment 1 zu einer Beeinflussung der Körperrepräsentation kam.

5.5. Experiment 2: Kalorische vestibuläre Stimulation

5.5.1. Ergebnisse

Betrachtet man die Daten der statistischen Auswertung von Experiment 2, findet sich eine signifikante Veränderung. Beim Vergleich der gemessenen

Werte von CVS und Post-Messung wurden die Extremitäten der linken Seite während der CVS durchschnittlich als kürzer eingeschätzt. Bei Betrachtung der rechten Seite fand sich keine Veränderung der Messgenauigkeit während den einzelnen Versuchsdurchläufen von Experiment 2. Die Veränderung der Messgenauigkeit auf der linken Seite zwischen CVS und Post-Messung muss jedoch als Artefakt eingestuft werden.

5.5.2. Bewertung des Ergebnisses

Dies beruht auf verschiedenen Gründen: Zum einen variierte die Anzahl der während der CVS ausgewerteten Trials von Proband zu Proband (da nur jene Trials ausgewertet wurden, während derer subjektiv Schwindel empfunden wurde), somit ist die Anzahl der gewerteten Trials uneinheitlich. Zum anderen war die vom Hospital Stroke Programm vorgegebene Startlänge der Extremitäten während der CVS nicht ausbalanciert: Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass im Mittel 7.62 (SD±1.88) Trials gewertet wurden, von diesen gerundet ersten acht Trials untersuchten lediglich drei die linke Seite, wobei deren durchschnittliche Startlänge 0.87 (SD±0.34) betrug. Ein ausbalancierter Wert wäre 1.0, folglich war die Startlänge dieser Trials im Mittel zu kurz. Zudem trat der gefundene signifikante Effekt nur im Vergleich zur Post-Messung, jedoch nicht im Vergleich zur Prä-Messung auf, was nicht logisch zu erklären ist. Aufgrund dieser Tatsachen ist der gefundene Effekt als sehr unsicher zu betrachten und am ehesten als Artefakt zu werten, wodurch auch in Experiment 2 keine Veränderung der vestibulären Stimulation (hier CVS) auf die Körperrepräsentation der Arm und Beinlängen beobachtet werden konnte.

5.5.3. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien

5.5.3.1. Vergleich mit Studien an Neglect Patienten

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, gibt es Studien, die einen positiven Effekt der CVS auf die Symptome von Neglect Patienten beobachtet haben (Cappa *et al.*, 1987; Sturt and Punt, 2013); da Neglect als eine Erkrankung der Körperrepräsentation betrachtet werden kann (Mast *et al.*, 2014), stellt sich die Frage, warum in unserem Experiment 2 keine Veränderung der Wahrnehmung des Körpers durch CVS festgestellt werden konnte.

Bei Neglect kommt es zu einer Verschiebung der Raumachse des Patienten auf die Seite der Läsion, welche durch CVS in Richtung Normalposition gebracht werden kann (Fink and Heide, 2004), dadurch lässt sich ein positiver Effekt auf die Neglect Symptomatik erklären. Eine Verschiebung der Raumachse nach links durch CVS (kalt, linker Gehörgang) konnte auch bei gesunden Probanden bei einem Versuchsaufbau in absoluter Dunkelheit (Karnath, 1994) beobachtet werden. Betrachtet man jedoch die Aufmerksamkeit im Gesichtsfeld bei gesunden Probanden, lassen sich laut Rorden, Karnath und Driver (2001) durch CVS keine Veränderungen beobachten. Dies erklären sie durch folgende These: der Raum auf einer Seite der Körperachse wird in kontralateral dazu gelegenen Hirnarealen repräsentiert. Bei Läsionen in diesen Arealen einer Seite kommt es zum kontralateralen Neglect. Durch CVS kann die Raumachse des Probanden rotiert werden, was dazu führt, dass zuvor nicht wahrgenommene Reize sich nun in der ipsiläsional gelegenen Raumhälfte befinden und dadurch wahrgenommen werden, es kommt zu einer Verbesserung der Neglectsymptomatik. Bei Gesunden, die keine Beeinträchtigung der erwähnten Hirnareale zeigen, führt die CVS jedoch zu keiner Veränderung. Dadurch ließe sich auch erklären, dass in unserem Experiment 2 keine Veränderungen zu beobachten waren, da wir gesunde Probanden untersucht haben.

5.5.3.2. Vergleich mit Studien an gesunden Probanden

Deswegen bietet es sich an, unsere Ergebnisse mit Studien, die die Effekte der CVS auf die Körperrepräsentation gesunder Probanden untersucht haben, zu vergleichen. Hierbei wurden bei verschiedenen Aufgabenstellungen Effekte beobachtet. Sowohl Ferrè, Bottini und Haggard (2011) als auch Ferrè, Bottini *et al.* (2013) stellten durch CVS eine Verbesserung der taktilen Wahrnehmung beider Hände fest. Lopez *et al.* (2012) beobachtete eine Veränderung von Einschätzung taktiler Entfernungen an der linken Hand, wobei diese unter CVS als länger wahrgenommen wurden. In einem zweiten Experiment der Studie von Lopez *et al.* (2012) mussten anatomische Landmarken der linken Hand lokalisiert werden, wobei unter CVS die linke Hand sowohl als länger als auch breiter eingeschätzt wurde. In den genannten Studien wurden bei unterschiedlichem Versuchsaufbau Effekte der CVS auf die

Körperrepräsentation gefunden, gemein hatten die genannten Studien jedoch, dass sie taktile Einflüsse untersuchten.

5.5.3.3. Vergleich mit Studie ohne taktile Einflüsse

Schönherr und May (2016) führten ein Experiment durch, das am ehesten mit unserem vergleichbar ist, da es ohne taktile Stimuli funktionierte. In ihrer Studie mussten Probanden ihre Körpermaße einschätzen, indem sie vor und nach CVS bei geschlossenen Augen die Breite ihrer Oberschenkel durch Zeigen angeben mussten. Dabei wurden nach CVS die Oberschenkel auf beiden Seiten dünner eingeschätzt. Obwohl die genannte Studie die Körperrepräsentation in ähnlicher Weise zu unserer Studie untersuchte, konnten Schönherr und May (2016) im Gegensatz zu uns einen signifikanten Effekt beobachten, was sich womöglich durch den fehlenden visuellen Input in der genannten Studie erklären lässt.

5.6. Gesamte Studie

5.6.1. Unterschiedliche Effekte der Stimulationsarten

Ein Vergleich von Studien, bei denen anatomische Landmarken auf der Hand lokalisiert werden mussten, ist interessant, da hierbei die Größenwahrnehmung untersucht wurde. Bei Stimulation durch GVS zeigte sich keine messbare Veränderung (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013), wohingegen durch CVS ein messbarer Effekt auftrat, und zwar wurde die Hand während der Stimulation als länger und breiter wahrgenommen (Lopez *et al.*, 2012). Dies lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass die CVS im Gegensatz zur GVS zu einer stärkeren Stimulation führt und somit diese stärkere Stimulation einen Effekt auslöst (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013). In unserer Studie ließ sich weder durch GVS noch durch CVS ein sicherer Effekt auf die Körperrepräsentation beobachten, was nicht durch die genannte Theorie erklärt werden kann. Deswegen muss dafür ein anderer Erklärungsansatz gefunden werden.

5.6.2. Verminderte Aktivität visueller Cortex

Im Gegensatz zu den bereits erwähnten Studien, die den Einfluss der vestibulären Stimulation auf die taktile Lokalisationsfähigkeit (Lopez *et al.*, 2012;

Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013), die Lokalisation anatomischer Landmarken (Lopez *et al.*, 2012; Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013) sowie die Einschätzung der Oberschenkelbreite ohne taktile Stimuli (Schönherr and May, 2016) untersuchten, wurde in unserem Experiment die Wahrnehmung des Körpers durch eine VR-Brille modifiziert und gemessen, welche visuellen Input liefert. In Neuroimaging Studien ließ sich sowohl durch GVS als auch durch CVS eine verminderte Aktivität in den Brodman Arealen 17,18,19 beobachten (Wenzel *et al.*, 1996; Bense *et al.*, 2001), diese Areale beinhalten den visuellen Cortex, wo die Retina repräsentiert ist (Kawachi, 2017). Möglicherweise ist ein Ausbleiben von Effekten in unseren beiden Experimenten dadurch zu erklären, dass der visuelle Cortex durch die vestibuläre Stimulation weniger aktiv war, was zu einer Behinderung der Verarbeitung von visuellen Informationen führte. Hierdurch wurden mögliche durch vestibuläre Stimulation aufgetretene Effekte durch das Hospital Stroke Programm nicht ideal erfasst. Dennoch war ein derartiges Studiendesign sinnvoll, da die Wahrnehmung des eigenen Körpers unter anderem durch das Sehen geleistet wird (Vignemont, 2010), wodurch es sinnvoll erscheint, die Körperrepräsentation auch durch visuelle Messmethoden zu untersuchen.

5.6.3. Visuelle Überlagerung

Vergleicht man den Input, der die verschiedenen Arten der Wahrnehmung des Körpers beeinflusst, ergibt sich ein weiterer Erklärungsansatz: Es wird angenommen, dass das Körperschema zwar durch verschiedenste sensorische Informationen beeinflusst wird, betrachtet man jedoch jenen Teil, der für die Wahrnehmung der Körperstrukturen verantwortlich ist, wird dieser besonders vom Sehen beeinflusst (Schwoebel and Coslett, 2005). Daraus lässt sich möglicherweise ableiten, dass in unserer Studie die visuellen Informationen, die über die Körperstruktur vorhanden sind, die Modifikationen durch vestibuläre Stimulation überlagert haben.

Ähnliches zeigt sich auch bei Betrachtung verschiedener Studien. Zwar lässt sich bei gesunden Probanden durch kalorische vestibuläre Stimulation die Erkundungsbewegungen der Augen in Richtung stimulierte Seite verschieben, woraufhin die Bewegung der Augen jener von Neglect Patienten gleicht

(Karnath, Fetter and Dichgans, 1996). Allerdings wurde dieses Experiment in kompletter Dunkelheit durchgeführt. Betrachtet man die Ergebnisse von Karnath, Himmelbach und Perenin (2003), zeigt sich auch hier in ihrem ersten Experiment, in dem das Sehen ausgeschaltet ist, ein Verschieben von taktiler Erkundungsbewegung in Richtung der Seite der kalorischen vestibulären Stimulation, wohingegen in ihrem zweiten Experiment, in dem auf vorhandene LED Lichter gezeigt werden musste und das Sehen somit eine wichtige Rolle spielte, keine Verschiebungen beobachtet werden konnten. Ähnliches lässt sich auch bei Patienten, die unter einem einseitigen Ausfall des vestibulären Systems leiden, beobachten: in verschiedenen Tests zur Erfassung von Neglect Symptomen, die gemeinsam haben, dass sie unter vorhandener Sicht des Probanden stattfinden, zeigten diese Patienten keine Symptomatik eines Neglects (Conrad *et al.*, 2015). Die genannten Erkenntnisse legen die Annahme nahe, dass Sehen Effekte der vestibulären Stimulation überspielen bzw. ausschalten kann. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen unserer Studie, da wir durch keine der beiden Arten der vestibulären Stimulation eine Veränderung der Körperrepräsentation, gemessen auf visueller Ebene, beobachten konnten und somit in unserem Fall die Körperrepräsentation als stabil und weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen betrachtet werden kann.

5.7. Einschränkungen der Studie

5.7.1. Schwellenwertbestimmung

Eine Schwierigkeit die in Experiment 1 auftrat, war die vor der GVS durchgeführte Schwellenwertbestimmung um herauszufinden, mit welcher Stromstärke die einzelnen Probanden stimuliert werden sollten. Zwar wurde eine etablierte Methode in Form eines Stufenmodelles angewendet, um die Wahrnehmungsschwelle zu ermitteln (Wilkinson *et al.*, 2005), jedoch war es teilweise schwierig, diese in die Tat umzusetzen. Die Probanden wussten nicht, wie sich der kribbelnde bzw. prickelnde Effekt anfühlt, durch den die Wahrnehmungsschwelle definiert wurde, weswegen einige der Probanden von diesem Effekt berichteten, auch wenn kein Strom über die Elektroden floss (vermutlich wurde hier der vermeintliche Effekt allein durch die enganliegenden Elektroden ausgelöst). Somit wäre es möglich, dass trotz größter Bemühungen

unsererseits bei einigen Probanden der Schwellenwert nicht korrekt bestimmt wurde und dadurch mit zu geringer Stromstärke stimuliert wurde. Falls dies der Fall wäre, bestände die Möglichkeit, dass ein möglicher Effekt, in Form einer Veränderung der Einschätzung der Länge der Extremitäten durch die GVS nicht erkannt wurde, da Nakamura *et al.* (2015) eine positive Korrelation zwischen Stromstärke und gemessenen Effekten beobachten; in dieser Studie wurden allerdings Neglect-Patienten und Effekte auf Neglect-spezifische Tests untersucht.

5.7.2. Sham-Messung Experiment 1

Des Weiteren lässt sich die Durchführung der Sham Messung bei Experiment 1 kritisieren. Bei der Sham-Messung in unserem Experiment wurden die Elektroden angebracht, den Probanden gesagt, es werde stimuliert, jedoch kein Strom angeschaltet. Diese Methode wurde auch von einigen anderen Autoren beschrieben (Nakamura *et al.*, 2015; Oppenländer *et al.*, 2015). Da bei der vorher durchgeführten GVS unterhalb der Wahrnehmungsschwelle stimuliert wurde, nahmen wir bei der Versuchsplanung an, dass die Probanden nicht zwischen Stimulation und Sham-Messung unterscheiden können. Trotz alledem wurde von einigen Probanden nach der Sham-Messung gefragt, ob überhaupt stimuliert wurde. Für kommende Studien würde sich deshalb anbieten, eine Methode anzuwenden, die das Kribbeln der Stimulation imitiert, was erreicht wird, indem an jeder Seite unterhalb der GVS-Elektroden zusätzliche Elektroden angebracht werden (Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013). Da jedoch während der GVS keine signifikante Veränderung der Messgenauigkeit festgestellt wurde, hat eine womöglich nicht vollends zuverlässig Sham-Messung keine Auswirkung auf die gewonnenen Erkenntnisse.

5.7.3. Sham-Messung Experiment 2

Auch bei Experiment 2 lässt sich die Sham-Messung kritisieren, die in diesem Fall gar nicht stattfand. Um die Auswirkungen der durch CVS ausgelösten Nebeneffekte (z.B. Schwindel (Ferrè, Bottini and Haggard, 2011)) von den Auswirkungen, die allein durch die Stimulation des Vestibularorgans ausgelöst wurden, zu unterscheiden, wäre eine Sham-Messung sinnvoll. Dabei würde

sich anbieten, durch Applikation von kaltem Wasser in den rechten Gehörgang das Vestibularorgan auf der rechten Seite zu stimulieren, wodurch ebenfalls Nebeneffekte ausgelöst werden. Allerdings würde es durch die Stimulation des rechten Vestibularorgans zu einer Stimulation der linken Hirnhälfte kommen (Ferrè, Bottini, *et al.*, 2013). Die Verschaltung des Vestibularorgans weist allerdings eine rechtshemisphärische Dominanz auf (Ferrè, Bottini, *et al.*, 2013), weswegen eine derartige Stimulation als Sham-Messung gesehen werden könnte.

5.8. Ausblick

5.8.1. Verdienst der Studie

Unsere Studie hatte den Zweck zu untersuchen, ob durch vestibuläre Stimulation die Körperrepräsentation auf visueller Ebene in Bezug auf die Wahrnehmung der Länge der Extremitäten verändert wird. Obwohl weder durch GVS noch durch CVS Effekte beobachtet wurden, stellt unsere Studie einen Gewinn für die Wissenschaft dar. Durch Verwendung einer VR-Brille konnte eine möglichst große Identifikation des Probanden mit dem Avatar erreicht werden. Zudem gelang es, die Auswirkungen von verschiedenen Arten der vestibulären Stimulation auf die visuellen Informationen über den Körper zu untersuchen. Laut unserem aktuellen Wissensstand ist es das erste Experiment, das die Körperrepräsentation der Arme und Beine untersucht und sich nicht nur auf die Wahrnehmung eines Körperteiles, z.B. der Hände beschränkt, was in einigen vorherigen Studien der Fall war (Lopez *et al.*, 2012; Ferrè, Day, *et al.*, 2013; Ferrè, Vagnoni and Haggard, 2013; Sedda *et al.*, 2016). Da die Effekte von zwei verschiedenen Stimulationsarten an den gleichen Probanden untersucht wurden, lassen sich die Ergebnisse gut miteinander vergleichen. Da bei beiden Experimenten kein sicher signifikanter Effekt auftrat, ist davon auszugehen, dass unabhängig von den verschiedenen Stimulationsmodalitäten kein Effekt auf die Körperrepräsentation der Arm und Beinlängen auftritt. Dies geschah möglicherweise, da die Aktivität im visuellen Cortex geringer war oder da mögliche Effekte visuell überlagert wurden. Somit liefert unsere Studie interessante Erkenntnisse und auch Ideen für die Zukunft.

5.8.2. Ideen für die Zukunft

Durch das Hospital Stroke Programm ließ sich die Körperrepräsentation von allen Extremitäten untersuchen, was eine interessante Grundlage für künftige Studien liefern könnte.

Beispielsweise wäre es interessant, das Procedere unserer Studie an Neglect-Patienten durchzuführen. Die Studien, die positive Effekte von vestibulärer Stimulation auf die Symptome von Neglect Patienten untersuchen, tun dies anhand von Neglect spezifischen Tests (Cappa *et al.*, 1987; Sturt and Punt, 2013; Wilkinson *et al.*, 2014; Nakamura *et al.*, 2015; Oppenländer *et al.*, 2015). Aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbaus ist ein Vergleich mit unseren Experimenten schwierig. Eine Studie mit dem Hospital Stroke Programm zur Untersuchung der Symptome von Neglect Patienten sowie der entsprechenden Effekte der vestibulären Stimulation auf die Symptomatik würde einen Vergleich ermöglichen. Dadurch könnte man untersuchen, ob bei den Patienten im Gegensatz zu gesunden Probanden die Körperrepräsentation durch vestibuläre Stimulation verändert wird.

Die Körperrepräsentation beinhaltet viele verschiedene Parameter (Longo, 2016), in unserer Studie haben wir jedoch lediglich die Wahrnehmung der Arm- und Beinlängen untersucht. Interessant wäre zu sehen, welche Effekte vestibuläre Stimulation auf andere Teile der Körperrepräsentation hat. Beispielsweise könnte man neben der Längen- auch die Breitenwahrnehmung der Extremitäten untersuchen, hierzu müsste man das Hospital Stroke Programm dahingehend modifizieren, dass auch die Breite der Arme und Beine eingestellt werden kann. Außerdem könnte man auch die Längen- und Breitenwahrnehmung anderer Körperteile, beispielsweise des Rumpfes untersuchen, ebenfalls durch dementsprechende Modifikation der Parameter des Hospital Stroke Programmes. Diese Veränderungen müssten zwar zuerst mit einigem Aufwand technisch umgesetzt werden und würden die Durchführungsdauer der einzelnen Experimente verlängern, jedoch wäre dadurch eine ausführlichere Untersuchung der Körperrepräsentation auf visueller Ebene möglich.

Des Weiteren wäre es interessant, unsere These zum Erklären unserer

Ergebnisse, dass mögliche Effekte der vestibulären Stimulation durch visuellen Input überlagert werden, zu verifizieren. Man könnte hierzu eine Studie mit zwei verschiedenen Experimenten durchführen, wobei diese zur besseren Vergleichbarkeit von denselben Probanden durchlaufen werden. Hierbei könnte man im ersten Experiment die Breitenwahrnehmung der Oberschenkel bei geschlossenen Augen, nach dem Vorbild von Schönherr und May (2016) und im zweiten Experiment die Breitenwahrnehmung der Oberschenkel durch eine VR-Brille untersuchen, wobei man das Setting des Hospital Stroke Programms dementsprechend modifizieren könnte. Diese beiden Experimente wären unter verschiedenen Stimmulationsarten, beispielsweise GVS und CVS durchzuführen, um zu sehen, welchen Einfluss die verschiedenen Stimmulationsarten auf die Körperrepräsentation haben, und ob unterschiedliche Effekte beim Vergleich von vorhandenem und nicht vorhandenem visuellen Input auftreten. Wenn unsere These zutrifft, würde man Effekte der vestibulären Stimmulationen auf die Körperrepräsentation nur beim ersten Experiment, nicht aber beim zweiten erwarten, da der visuelle Input mögliche Effekte überlagert.

Zudem wäre es interessant zu untersuchen, ob bei Veränderung der Stimmulationsart Effekte messbar wären. Durch Vibration kann eine interessante Veränderung der Wahrnehmung des Körpers erreicht werden: bei der sogenannten Pinocchio Illusion wird durch Stimulation an Muskeln des Oberarmes bei Probanden das Gefühl ausgelöst, dass sich der Arm bewegt, wird gleichzeitig mit den Fingern die Nase berührt, hat der Proband das Gefühl, seine Nase wachse (Lackner, 1988). Durch Vibrationen der hinteren Nackenmuskeln der linken Seite wird bei gesunden Probanden die subjektive Körperachse nach links bewegt (Karnath *et al.*, 2002), bei Neglect Patienten finden sich durch Nackenvibration positive Effekte auf die Performance in Neglect spezifischen Tests (Schindler *et al.*, 2002; Schindler and Kerkhoff, 2004). Interessant wäre zu sehen, ob durch Nackenvibration Veränderungen der Körperrepräsentation in einem Setting mit dem Hospital Stroke Programm zu beobachten sind.

Unsere Studie hat einerseits dazu beigetragen, mögliche Verbindungen zwischen vestibulärer Stimulation und Körperrepräsentation besser zu

verstehen und zu untersuchen, sowie andererseits einen Anstoß für zukünftige Forschungsideen gegeben.

6. Zusammenfassung

In unserer Studie haben wir untersucht, ob verschiedene Arten der vestibulären Stimulation Einfluss auf die Körperrepräsentation in Form der visuellen Wahrnehmung der Arm- und Beinlängen haben. Die Körperrepräsentation wurde durch eine VR-Brille auf visueller Ebene simuliert und modifiziert, indem die Probanden die Arm- und Beinlänge eines auf ihre Körpermaße angepassten Avatars, den sie durch die VR-Brille sahen, ihren eigenen Körpermaßen anpassen mussten. Dabei wurde zeitweise das Vestibularorgan stimuliert, bei Experiment 1 durch GVS bei Experiment 2 durch CVS. Weder durch GVS noch durch CVS trat ein zuverlässig als signifikant zu wertender Effekt auf, die Messgenauigkeit der Extremitäten blieb im Vergleich zu den Versuchsdurchläufen ohne Stimulation gleich. Somit konnten wir keinen Effekt der von uns durchgeführten Arten der vestibulären Stimulation auf die Körperrepräsentation feststellen. Dies lässt sich möglicherweise damit erklären, dass dadurch, dass unsere Studie auf visuellen Input beruhte, mögliche Effekt der vestibulären Stimulation visuell überlagert wurden. Es ist anzunehmen, dass die Körperrepräsentation im Bereich der Wahrnehmung der Länge der Extremitäten ein recht stabiles Konstrukt und weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen ist.

7. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Hertie Institut für klinische Hirnforschung, Zentrum für Neurologie in der Sektion für Neuropsychologie, betreut von Prof. Dr. Dr. Hans-Otto Karnath, durchgeführt.

Der Aufbau der Studie wurde von Prof. Dr. Dr. Hans-Otto Karnath, Dr. rer. nat. M. Sc. Psychologie Simone Claire Mölbert und Dr. Betty J. Mohler zusammen mit mir erstellt. Das experimentelle Setup wurde von Dipl.- Inf. Joachim Tesch entwickelt.

Die Versuche an den Probanden wurden, nach Einarbeitung durch Dr. rer. nat. M. Sc. Psychologie Simone Claire Mölbert, von mir, mithilfe von Prof. Dr. Dr. Hans-Otto Karnath, der die kalorische vestibuläre Stimulation der Probanden übernahm, durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Anleitung durch Prof. Dr. Dr. Hans-Otto Karnath und Dr. rer. nat. M. Sc. Psychologie Simone Claire Mölbert durch mich.

Der eingereichte Artikel wurde von Prof. Dr. Dr. Hans-Otto Karnath und Dr. rer. nat. M. Sc. Psychologie Simone Claire Mölbert erstellt, und von allen Autoren überarbeitet.

Ich versichere, die Doktorarbeit „*Untersuchung der Rolle des vestibulären Systems für die Wahrnehmung der Körpermaße*“ alleine und nur unter Zuhilfenahme der zitierten Quellen geschrieben zu haben.

Tübingen, den 25.06.2018

Anna Katharina Klaner

8. Literaturverzeichnis

Akbarian, S., Grüsser, O.-J. and Guldin, W. O. (1994) 'Corticofugal Connections Between the Cerebral Cortex and Brainstem Vestibular Nuclei in the Macaque Monkey', *J Comp Neurol*, 339(3), pp. 421–437. doi: 10.1002/cne.903390309.

Amsterdam, B. (1972) 'Mirror Self-Image Reactions Before Age Two', *Dev Psychobiol*, 5(4), pp. 297–305. doi: 10.1002/dev.420050403.

André, J. M., Martinet, N., Paysant, J., Beis, J. M. and Chapelain, L. Le (2001) 'Temporary phantom limbs evoked by vestibular caloric stimulation in amputees', *Neuropsychiatry Neuropsychol Behav Neurol*, 14(3), pp. 190–196.

Arshad, Q., Nigmatullina, Y., Nigmatullin, R., Asavarut, P., Goga, U., Khan, S., Sander, K., Siddiqui, S., Roberts, R. E., Cohen Kadosh, R., Bronstein, A. M. and Malhotra, P. A. (2016) 'Bidirectional Modulation of Numerical Magnitude', *Cereb Cortex*, 26(5), pp. 2311–2324. doi: 10.1093/cercor/bhv344.

Bense, S., Stephan, T., Yousry, T. A., Brandt, T. and Dieterich, M. (2001) 'Multisensory cortical signal increases and decreases during vestibular galvanic stimulation (fMRI)', *J Neurophysiol*, 85(2), pp. 886–899. doi: 10.1152/jn.2001.85.2.886.

Bielefeld, J. (1991) 'Zur Begrifflichkeit und Strukturierung der Auseinandersetzung mit dem eigenen Körper', in Bielefeld, J. (ed.) *Körpererfahrung. Grundlagen menschlichen Bewegungsverhaltens*. 2nd edn. Hogrefe, pp. 3–35.

Bisiach, E., Rusconi, M. L. and Vallar, G. (1991) 'Remission of somatoparaphrenic delusion through vestibular stimulation', *Neuropsychologia*, 29(10), pp. 1029–1031. doi: 10.1016/0028-3932(91)90066-H.

Blanke, O., Ortigue, S., Landis, T. and Seeck, M. (2002) 'Stimulating illusory own-body perceptions', *Nature*, 419(6904), pp. 269–270. doi: 10.1038/419269a.

Bonnier, P. (2009) 'Asomatognosia P. Bonnier. L'aschématie. Revue Neurol 1905;13:605-9', *Epilepsy Behav*, 16(3), pp. 401–403. doi: 10.1016/j.yebeh.2009.09.020.

Bottini, G., Paulesu, E., Sterzi, R., E., W., Wise, R. J. S., Vallar, G., Frackowlak, R. S. J. and Frith, C. D. (1995) 'Modulation of conscious experience by peripheral sensory stimuli', *Nature*, 376(6543), pp. 778–781. doi: 10.1038/376778a0.

Cappa, S., Sterzi, R., Vallart, G. and Bisiach, E. (1987) 'Remission of hemineglect and anosognosia during vestibular stimulation', *Neuropsychologia*, 25(5), pp. 775–782. doi: 10.1016/0028-3932(87)90115-1.

Chapelain, L. Le, Beis, J. M., Paysant, J. and André, J. M. (2001) 'Vestibular caloric stimulation evokes phantom limb illusions in patients with paraplegia', *Spinal Cord*, 39(2), pp. 85–87. doi: 10.1038/sj.sc.3101093.

Conrad, J., Habs, M., Brandt, T. and Dieterich, M. (2015) 'Acute Unilateral

Vestibular Failure Does Not Cause Spatial Hemineglect', *PLoS One*, 10(8), pp. 1–8. doi: 10.1371/journal.pone.0135147.

Dieterich, M. (2006) 'Vestibuläres System und Störungen der vestibulären Raumorientierung', in Karnath, H. O. and Thier, P. (eds) *Neuropsychologie*. 2nd edn. Springer Verlag, pp. 197–205.

Dijkerman, H. C. (2016) 'On Feeling and Reaching: Touch, Action, and Body Space', in Postma, A. and Ham, I. J. M. van der (eds) *Neuropsychology of Space: Spatial Functions of the Human Brain*. Academic Press, pp. 77–122. doi: 10.1016/B978-0-12-801638-1.00003-3.

Dijkerman, H. C. and Haan, E. H. F. de (2007) 'Somatosensory processes subserving perception and action', *Behav Brain Sci*, 30(2), pp. 189–201. doi: 10.1017/S0140525X07001392.

Eulenburg, P. zu, Caspers, S., Roski, C. and Eickhoff, S. B. (2012) 'Meta-analytical definition and functional connectivity of the human vestibular cortex', *Neuroimage*, 60(1), pp. 162–169. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.12.032.

Fasold, O., Brevern, M. von, Kuhberg, M., Ploner, C. J., Villringer, A., Lempert, T. and Wenzel, R. (2002) 'Human Vestibular Cortex as Identified with Caloric Stimulation in Functional Magnetic Resonance Imaging', *Neuroimage*, 17(3), pp. 1384–1393. doi: 10.1006/nimg.2002.1241.

Ferrè, E. R., Bottini, G. and Haggard, P. (2011) 'Vestibular modulation of somatosensory perception', *Eur J Neurosci*, 34(8), pp. 1337–1344. doi: 10.1111/j.1460-9568.2011.07859.x.

Ferrè, E. R., Bottini, G., Iannetti, G. D. and Haggard, P. (2013) 'The balance of feelings: Vestibular modulation of bodily sensations', *Cortex*, 49(3), pp. 748–758. doi: 10.1016/j.cortex.2012.01.012.

Ferrè, E. R., Day, B. L., Bottini, G. and Haggard, P. (2013) 'How the vestibular system interacts with somatosensory perception: A sham-controlled study with galvanic vestibular stimulation', *Neurosci Lett*, 550, pp. 35–40. doi: 10.1016/j.neulet.2013.06.046.

Ferrè, E. R., Vagnoni, E. and Haggard, P. (2013) 'Vestibular contributions to bodily awareness', *Neuropsychologia*, 51(8), pp. 1445–1452. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2013.04.006.

Fink, G. R. and Heide, W. (2004) 'Räumlicher neglect', *Nervenarzt*, 75(4), pp. 389–410. doi: 10.1007/s00115-004-1698-3.

Gallagher, S. (2007) 'How the Body Shapes the Mind', *Philos Psychol*, 20(1), pp. 127–142. doi: 10.1080/09515080601108096.

Gallup, G., Anderson, J. R. and Shillito, D. J. (2002) 'The Mirror Test', in Bekoff, M., Colin, A., and Burghardt, G. M. (eds) *The cognitive animal: Empirical and theoretical perspectives on animal cognition*. Bradford, pp. 325–33.

Grabherr, L., Lenggenhager, B. and Macaudo, G. (2015) 'The moving history of vestibular stimulation as a therapeutic intervention', *Multisens Res*, 28(5–6), pp.

653–687. doi: 10.1163/22134808-00002495.

Guldin, W. O., Akbarian, S. and Grüsser, O. -J. (1992) 'Cortico-Cortical Connections and Cytoarchitectonics of the Primate Vestibular Cortex: A Study in Squirrel Monkeys (*Saimiri sciureus*)', *J Comp Neurol*, 326(3), pp. 375–401. doi: 10.1002/cne.903260306.

Husain, M. and Kennard, C. (1996) 'Visual neglect associated with frontal lobe infarction', *J Neurol*, 243(9), pp. 652–657. doi: 10.1007/BF00878662.

Javia, L. and Sardesai, M. G. (2017) 'Physical Models and Virtual Reality Simulators in Otolaryngology', *Otolaryngol Clin North Am*, 50(5), pp. 875–891. doi: 10.1016/j.otc.2017.05.001.

Karnath, H.-O. (1994) 'The interactive contribution of neck muscle proprioception and vestibular stimulation to subjective "straight ahead" orientation in man', *Exp Brain Res*, 101(1), pp. 140–146. doi: 10.1007/BF00243223.

Karnath, H.-O. (2006) 'Anosognosie', in Karnath, H.-O. and Thier, P. (eds) *Neuropsychologie*. 2nd edn. Springer Verlag, pp. 565–575.

Karnath, H.-O. and Dieterich, M. (2006) 'Spatial neglect — a vestibular disorder?', *Brain*, 129(2), pp. 293–305. doi: 10.1093/brain/awh698.

Karnath, H.-O., Fetter, M. and Dichgans, J. (1996) 'Ocular exploration of space as a function of neck proprioceptive and vestibular input-observations in normal subjects and patients with spatial neglect after parietal lesions', *Exp Brain Res*, 109(2), pp. 333–342. doi: 10.1007/BF00231791.

Karnath, H.-O., Himmelbach, M. and Perenin, M. T. (2003) 'Neglect-like behavior in healthy subjects: Dissociation of space exploration and goal-directed pointing after vestibular stimulation', *Exp Brain Res*, 153(2), pp. 231–238. doi: 10.1007/s00221-003-1596-0.

Karnath, H.-O., Reich, E., Rorden, C., Fetter, M. and Driver, J. (2002) 'The perception of body orientation after neck-proprioceptive stimulation. Effects of time and of visual cueing', *Exp Brain Res*, 143(3), pp. 350–358. doi: 10.1007/s00221-001-0996-2.

Kawachi, J. (2017) 'Brodmann Areas 17, 18, and 19 in the Human Brain: An Overview', *Brain Nerve*, 69(4), pp. 397–410. doi: 10.11477/mf.1416200756.

Kerkhoff, G. and Schenk, T. (2012) 'Rehabilitation of neglect: An update', *Neuropsychologia*, 50(6), pp. 1072–1079. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.01.024>.

Kerrebroeck, H. van, Brengman, M. and Willems, K. (2017) 'Escaping the crowd: An experimental study on the impact of a Virtual Reality experience in a shopping mall', *Comput Human Behav*, 77, pp. 437–450. doi: 10.1016/j.chb.2017.07.019.

Lackner, J. R. (1988) 'Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation', *Brain*, 111(2), pp. 281–297. doi:

10.1093/brain/111.2.281.

Li, K. and Malhotra, P. A. (2015) 'Spatial neglect', *Pract Neurol*, 15(5), pp. 333–339. doi: 10.1136/practneurol-2015-001115.

Lobel, E., Kleine, J. F., Bihan, D. L., Leroy-Willig, A. and Berthoz, A. (1998) 'Functional MRI of Galvanic Vestibular Stimulation', *J Neurophysiol*, 80(5), pp. 2699–2709. doi: 10.1152/jn.1998.80.5.2699.

Longo, M. R. (2016) 'Types of Body Representation', in Coello, Y. and Fischer, M. H. (eds) *Perceptual and Emotional Embodiment: Foundations of embodied cognition volume 1*. 1st edn. Psychology Press, pp. 117–134.

Lopez, C. (2016) 'The vestibular system: balancing more than just the body', *Curr Opin Neurol*, 29(1), pp. 74–83. doi: 10.1097/WCO.0000000000000286.

Lopez, C., Schreyer, H.-M., Preuss, N. and Mast, F. W. (2012) 'Vestibular stimulation modifies the body schema', *Neuropsychologia*. Elsevier, 50(8), pp. 1830–1837. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.04.008.

Mast, F. W., Preuss, N., Hartmann, M. and Grabherr, L. (2014) 'Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture', *Front Integr Neurosci*, 8(44), pp. 1–14. doi: 10.3389/fnint.2014.00044.

Mölbert, S. C., Thaler, A., Mohler, B. J., Streuber, S., Romero, J., Black, M. J., Zipfel, S., Karnath, H.-O. and Giel, K. E. (2018) 'Assessing body image in anorexia nervosa using biometric self-avatars in virtual reality: Attitudinal components rather than visual body size estimation are distorted', *Psychol Med*, 48(4), pp. 642–653. doi: 10.1017/S0033291717002008.

Nakamura, J., Kita, Y., Ikuno, K., Kojima, K., Okada, Y. and Shomoto, K. (2015) 'Influence of the stimulus parameters of galvanic vestibular stimulation on unilateral spatial neglect', *Neuroreport*, 26(8), pp. 462–466. doi: 10.1097/WNR.0000000000000369.

Oppenländer, K., Keller, I., Karbach, J., Schindler, I., Kerkhoff, G. and Reinhart, S. (2015) 'Subliminal galvanic-vestibular stimulation influences ego- and object-centred components of visual neglect', *Neuropsychologia*, 74, pp. 170–177. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.039.

Perry, R. J. and Zeki, S. (2000) 'The neurology of saccades and covert shifts in spatial attention: an event-related fMRI study', *Brain*, 123(11), pp. 2273–2288. doi: 10.1093/brain/123.11.2273.

Piryankova, I. V., Wong, H. Y., Linkenauger, S. A., Stinson, C., Longo, M. R., Bühlhoff, H. H. and Mohler, B. J. (2014) 'Owning an Overweight or Underweight Body : Distinguishing the Physical , Experienced and Virtual Body', *PLoS One*, 9(8), pp. 1–13. doi: 10.1371/journal.pone.0103428.

Plotnik, J. M., Waal, F. B. M. de and Reiss, D. (2006) 'Self-recognition in an Asian elephant', *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(45), pp. 17053–17057. doi: 10.1073/pnas.0608062103.

- Prior, H., Pollok, B. and Güntürkün, O. (2000) 'Sich Selbst vis-à-vis: Was Elstern Wahrnehmen', *Rubin*, 2, pp. 26–30.
- Probst, R. (2008) 'Vestibuläre Störungen', in Probst, R., Grevers, G., and Iro, H. (eds) *Hals-Nasen-Ohre-Heilkunde*. 3rd edn. Georg Thieme Verlag, pp. 247–262.
- Ramakonar, H., Franz, E. A. and Lind, C. R. P. (2011) 'The rubber hand illusion and its application to clinical neuroscience', *J Clin Neurosci*, 18(12), pp. 1596–1601. doi: 10.1016/j.jocn.2011.05.008.
- Ravi, D. K., Kumar, N. and Singhi, P. (2017) 'Effectiveness of virtual reality rehabilitation for children and adolescents with cerebral palsy: an updated evidence-based systematic review', *Physiotherapy*, 103(3), pp. 245–258. doi: 10.1016/j.physio.2016.08.004.
- Reiss, D. and Marino, L. (2001) 'Mirror self-recognition in the bottlenose dolphin: A case of cognitive convergence', *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98(10), pp. 5937–5942. doi: 10.1073/pnas.101086398.
- Riestra, A. R. and Barrett, A. M. (2013) 'Rehabilitation of spatial neglect', *Handb Clin Neurol*, 110, pp. 347–355. doi: 10.1016/B978-0-444-52901-5.00029-0.
- Robinette, K., Daanen, H. and Paquet, E. (1999) 'The CAESAR project: a 3-D surface anthropometry survey', *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 380–386. doi: 10.1109/IM.1999.805368.
- Rode, G., Vallar, G., Revol, P., Tilikete, C., Jacquin-Courtois, S., Rossetti, Y. and Farnè, A. (2012) 'Facial macrosomatognosia and pain in a case of Wallenberg's syndrome: Selective effects of vestibular and transcutaneous stimulations', *Neuropsychologia*, 50(2), pp. 245–253. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.11.018.
- Rorden, C., Karnath, H.-O. and Driver, J. (2001) 'Do neck-proprioceptive and caloric-vestibular stimulation influence covert visual attention in normals, as they influence visual neglect?', *Neuropsychologia*, 39(4), pp. 364–375.
- Roy, E., Bakr, M. M. and George, R. (2017) 'The need for virtual reality simulators in dental education: A review', *Saudi Dent J*, 29(2), pp. 41–47. doi: 10.1016/j.sdentj.2017.02.001.
- Schindler, I. and Kerkhoff, G. (2004) 'Convergent and divergent effects of neck proprioceptive and visual motion stimulation on visual space processing in neglect', *Neuropsychologia*, 42(9), pp. 1149–1155. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2004.02.006.
- Schindler, I., Kerkhoff, G., Karnath, H.-O. and Goldenberg, G. (2002) 'Neck muscle vibration induces long lasting recovery in spatial neglect', *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 73(4), pp. 412–419. doi: 10.1136/jnnp.73.4.357.
- Schönherr, A. and May, C. A. (2016) 'Influence of Caloric Vestibular Stimulation on Body Experience in Healthy Humans', *Front Integr Neurosci*, 10(14), pp. 1–8. doi: 10.3389/fnint.2016.00014.

Schwoebel, J. and Coslett, H. B. (2005) 'Evidence for Multiple, Distinct Representations of the Human Body', *J Cogn Neurosci*, 17(4), pp. 543–553. doi: 10.1162/0898929053467587.

Sedda, A., Tonin, D., Salvato, G., Gandola, M. and Bottini, G. (2016) 'Left caloric vestibular stimulation as a tool to reveal implicit and explicit parameters of body representation', *Conscious Cogn*, 41, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.concog.2016.01.012.

Spaccavento, S., Cellamare, F., Falcone, R., Loverre, A. and Nardulli, R. (2017) 'Effect of subtypes of neglect on functional outcome in stroke patients', *Ann Phys Rehabil Med*, 60(6), pp. 376–381. doi: 10.1016/j.rehab.2017.07.245.

Sturt, R. and Punt, T. D. (2013) 'Caloric vestibular stimulation and postural control in patients with spatial neglect following stroke', *Neuropsychol Rehabil*, 23(2), pp. 299–316. doi: 10.1080/09602011.2012.755831.

Suddendorf, T. and Collier-Baker, E. (2009) 'The evolution of primate visual self-recognition: evidence of absence in lesser apes', *Proc Biol Sci*, 276(1662), pp. 1671–1677. doi: 10.1098/rspb.2008.1754.

Vignemont, F. de (2010) 'Body schema and body image-Pros and cons', *Neuropsychologia*, 48(3), pp. 669–680. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.022.

Weiß, C. (2010) *Basiswissen Medizinische Statistik*. 5th edn. Springer Verlag.

Wenzel, R., Bartenstein, P., Dieterich, M., Danek, A., Weindl, A., Minoshima, S., Ziegler, S., Schwaiger, M. and Brandt, T. (1996) 'Deactivation of human visual cortex during involuntary ocular oscillations. A PET activation study', *Brain*, 119(1), pp. 101–110. doi: 10.1093/brain/119.1.101.

Wilkinson, D., Ko, P., Kilduff, P., McGlinchey, R. and Milberg, W. (2005) 'Improvement of a face perception deficit via subsensory galvanic vestibular stimulation', *J Int Neuropsychol Soc*, 11(7), pp. 925–929. doi: 10.1017/S1355617705051076.

Wilkinson, D., Zubko, O., Sakel, M., Coulton, S., Higgins, T. and Pullicino, P. (2014) 'Galvanic vestibular stimulation in hemi-spatial neglect', *Front Integr Neurosci*, 8(4), pp. 1–12. doi: 10.3389/fnint.2014.00004.

9. Danksagung

Meinen Dank für das Gelingen dieser Doktorarbeit möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Dr. Hans-Otto Karnath sowie Dr. rer. nat. M. Sc. Psychologie Simone Claire Mölbert aussprechen, die mir bei allen aufkommenden Fragen mit gutem Rat zur Seite standen. Zudem möchte ich Dipl.- Inf. Joachim Tesch sowie Dr. Betty J. Mohler danken, die mir bei technischen Fragen stets weiterhalfen. Des Weiteren möchte ich meinen Dank meinen Eltern Michael Klaner und Karin Bader-Klaner sowie meinem Bruder Simon Sebastian Klaner aussprechen für die seelische Unterstützung und das Exil im Allgäuer Voralpenland, wo ein großer Teil der Arbeit abseits von jeglicher Ablenkung entstanden ist. Ein besonderer Dank geht auch an meine lieben Freunde, die mir stets mit aufmunternden Worten zur Seite standen, für eine gute Work-Life Balance sorgten, einige sich auch als Probanden für meine Studie zur Verfügung stellten und somit aktiv zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Natürlich danke ich zu guter Letzt auch allen anderen Probanden, durch deren Einsatz die Studie erst möglich geworden ist.