

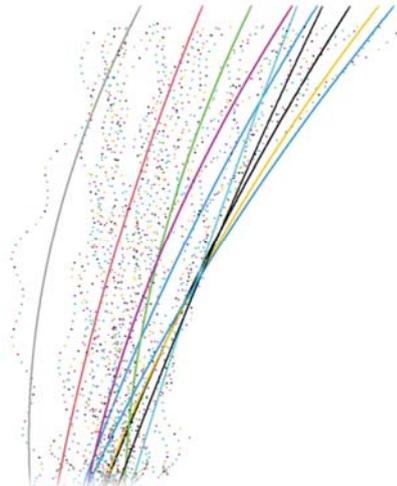


# "Geradeaus" neu kalibrieren: Adaptation in "Redirected Walking" über die Zeit

Westfälische-Wilhelms-Universität Münster

Institut für Psychologie

27.11.2020



Erstprüfer: Prof. Dr. Markus Lappe

Zweitprüfer: Dr. Harald Frenz

Abschlussarbeit M. Sc. Psychologie

von

Luke Bölling

Niedersachsenring 54  
48147 Münster  
luke.boelling@wwu.de  
Matrikelnummer: 408080

## **Zusammenfassung**

Virtual Reality überzeugt vor allem durch die intuitive Benutzung. Alltägliche Bewegungsabläufe können direkt angewandt werden. Um sich frei bewegen zu können, benötigt man jedoch sehr viel Platz. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob es möglich ist Testpersonen an manipulierte virtuelle Welten zu gewöhnen (Adaptation), sodass in der realen Welt gelaufene Kreisbahnen (Curvature-Gains) als gerade virtuelle Strecken wahrgenommen werden. Zudem wurde untersucht, ob sich Lauf- und Zeigebewegungen entsprechend der manipulierten virtuelle Bewegung verändern.

Dazu wurden jeweils Messungen vor und nach den Adaptationsphasen an fünf Tagen über einen Zeitraum von insgesamt 12 Tagen durchgeführt. Insgesamt wurden 9 Testpersonen im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Wahrnehmungsschwelle für Curvature-Gains verschieben lässt. Für die Laufbewegung ohne visuelles Feedback konnte eine Krümmung der Laufstrecke in Richtung des Adaptationsgains festgestellt werden. Eine Änderung des Zeigeverhaltens in die Geradeaus-Richtung konnte nicht gezeigt werden. Adaptationseffekte wirkten in diesem Experiment nicht über die Sitzungen hinweg. Dies galt auch für die Laufbewegung. Mögliche Interaktionseffekte, die sich aus der Messung der Schwellenwerte und der Adaptationsphasen ergeben, werden diskutiert.

## Laufen in der virtuellen Realität

### Redirected Walking in Virtuellen Umgebungen

Im vergangenen Jahrzehnt hat sich die Darstellung von Räumen als virtuelle Umgebung (VU) mit Virtual Reality (VR) Brillen und Augmented-Reality-Geräten z.B. via Smartphones in vielen Kontexten etabliert (z.B. in Museen, Kunst oder Freizeitparks). Für viele Anwendungen ist es gewünscht, große virtuelle Welten erkunden zu können. Ein stark limitierender Faktor bei der Übertragung von echten natürlichen Laufbewegungen durch die VU, ist die physikalische Größe des genutzten Raumes, in dem sich ein Nutzer bewegt. Ein Meter in der Realität entspricht im Normalfall auch einem Meter in der virtuellen Umgebung. D. h die visuelle Bewegung auf dem Display und die Eigenbewegung werden zusammenhängend wahrgenommen, da sie jederzeit systematisch voneinander abhängen und die eigene Bewegung direktes visuelles Feedback erzeugt, auch in der virtuellen Welt. In VR ist es möglich diesen Zusammenhang zu manipulieren, indem die VU manipuliert wird, zum Beispiel Bereiche hinter einer Person verschoben werden oder die Auswirkungen der physischen Bewegung verändert werden. D.h. zum Beispiel das eine psychische Bewegung durch ein in entgegengesetzter Richtung laufendes Laufband kompensiert werden (Mulavara et al., 2005). Die Anwender erhalten so den Eindruck einer natürlichen Laufbewegung, ohne sich tatsächlich im Raum zu bewegen.

Um virtuelle Räume größer erscheinen zu lassen, als es die physische Umgebung eigentlich zulassen würde, werden Anwendende in dem Glauben gelassen, dass ihre normalen physikalischen Bewegungen 1:1 in der virtuellen Umgebung ausgeführt werden, während sie tatsächlich, wie im Falle des Laufbandes, gar nicht in eine tatsächliche Bewegung durch den physikalischen Raum münden.

Für diese Art der Entkopplung von physikalischer und virtueller Bewegung ergeben sich drei Bereiche, die zu einer Manipulation genutzt werden können.

Bei physischen Manipulation erzielt man durch Relokalisierung der Anwender (wie im Falle des Laufbandes) bzw. durch die mechanische Entkoppelung von körperlicher Bewegung und tatsächlicher Bewegung im Raum, eine Wahrnehmung einer freien Bewegung im virtuellen Raum trotz begrenzten physikalischen Raum. Hier sind mechanische Mechanismen gemeint, wie beispielsweise Plattformen, die die Nutzer aktiv bewegen (entgegen ihrer eigenen Laufbewegung) (Lichtenstein et al., 2007), Anzüge in denen Nutzer von virtuellen Umgebungen „eingehängt“ werden, sodass die Person beim Laufen nicht mehr den Boden berührt oder spezielle Schuhe, die beim Laufen wieder zurückrutschen (Boletsis, 2017).

Darüber hinaus können auch Manipulationen der Architektur des virtuellen Raumes stattfinden. Hier wird die virtuelle Umgebung entweder offensichtlich oder versteckt so manipuliert, also Objekte verschoben oder die Person selbst innerhalb der virtuellen Umgebung umgesetzt, dass der physisch verfügbare Raum ausreicht, um den Nutzer eine freie Navigation in der virtuellen Umgebung zu ermöglichen. So können zum Beispiel verschiedene virtuelle Räume so konstruiert werden, dass Sie sich überlagern und so eine nicht-euklidischen Raum bilden (Suma et al., 2011, Suma et al., 2012; Suma et al. 2012, März).

Als letzter Bereich kann die Übertragungsmanipulation definiert werden. Hier werden die erfassten Echtzeit-Bewegungsdaten nicht 1:1 in die virtuelle Umgebung übertragen, sondern mit einem Faktor (*Gain*) verrechnet. Dadurch wird aus einem Meter in der echten Welt z.B. 1.2 m in der virtuellen Welt (Translationsmanipulation). Gleichzeitig kann beispielsweise eine 90°-Drehung in der realen Welt auf 80°-Drehung in der virtuellen Welt reduziert werden (Rotationsmanipulation). Razaque, Kohn und Whitton (2005) beschrieben für die Übertragungsmanipulationen als erste eine Technik, um ihre virtuelle Umgebung,

größer erscheinen zu lassen. Sie nutzten dabei aus, dass kleine Unterschiede zwischen physischer realer Rotation und dargestellter virtueller Rotation durch die Anwender nicht erkennbar sind. Diese nicht wahrnehmbaren Unterschiede wurden gezielt eingesetzt, um Weg und Orientierung, die in der virtuellen Welt dargestellt wurden, vom tatsächlich gelaufenen Pfad bzw. von der tatsächlichen Orientierung abweichen zu lassen. Später wurden von Steinicke und Kollegen (2008) verschiedene Experimente vorgestellt, die sich genauer mit den exakten Wahrnehmungsschwellen einer solchen Verstärkung bzw. Verringerung der Orientierungswinkelübertragung der Nutzer und mit Wahrnehmungsschwellen für Translationsmanipulationen beschäftigen.

Eine erweiterte Form dieser Übertragungsmanipulationen beschäftigt sich mit der Ablenkung des Nutzers auf eine gebogene Strecke (Steinicke et al. 2008, 2009). Bei der Anwendung von sogenannten „Curvature-Gains“ wird im klassischen Fall das gesamte Virtuelle Koordinatensystem proportional zur Vorwärtsbewegung des Probanden gedreht. Dadurch werden virtuell gerade verlaufende Strecken zu Kreisbahnen im realen Raum. Nutzer können so, unabhängig von Ihrem Startpunkt, mit jedem Schritt auf eine Kreisbahn geführt werden. Dies führt innerhalb eines begrenzten Raumes zu einer abgeschlossenen Kreisbahn. Der Anwender läuft, solange er unter der Wahrnehmungsschwelle bleibt, auf einer scheinbar unendlich begehbaren geraden Laufstrecke im virtuellen Raum, ohne die eigene bogenförmigen Laufbewegung im physikalischen Raum wahrzunehmen. Für diese Art der Manipulation hat sich eine Beschreibung der Stärke des Curvature-Gains in Radius des zugrundeliegenden Kreises etabliert. Die gelaufene bogenförmige Strecke wird als Teil eines Kreises mit einem bestimmten Radius  $R$  betrachtet. Größere Radien entsprechen einer weniger gebogenen realen Laufstrecke, kleinere Radien zeigen stärker gebogene Strecken an. Steinicke et al. (2008) haben für einen einfachen Curvature-Gain eine Wahrnehmungsschwelle von 22,03m für einen solchen Radius gefunden (Steinicke et al.,

2010). Hat der Kreis einen größeren Radius wird die Manipulation von der Testperson nicht mehr wahrgenommen. Weitere Forschung ergab, dass auch Radii von 11,6m (Grechkin et al., 2016) und 6,4m (Rietzler et al. (2018)) unter bestimmte Bedingung als nicht bewusst wahrnehmbare Kreiskrümmungen beim Laufen möglich sind. Die Methode lässt sich dementsprechend weiter ausreizen. Gerade die Kombination von Translationsmanipulationen und Curvature-Gains hat sich als gute Methode bewährt, die Raumgröße in virtuellen Umgebungen optimal auszunutzen, ohne negative Effekte für die Nutzer, wie zum Beispiel „Übelkeit“ auszulösen (Nilsson et al.,2018).

Auch die Kombination von Curvature-Gains mit bereits innerhalb der virtuellen Umgebung gekrümmten Wegen, kann nach Langbehn und Kollegen (2017) zu einer sehr wirksamen Ausnutzung des physikalischen Raumes genutzt werden. Sie konnten so, ohne dass die Testpersonen es wahrnahmen, einen virtuellen Weg mit einem Radius von 10,88 m auf einen physikalisch gelaufenen Kreisbogen mit einem Radius von 2,5 m verringern, ohne dass die Personen die zusätzliche Krümmung wahrnehmen konnten.

Insgesamt ist die Nutzung von Gains und insbesondere Curvature-Gains zur möglichen Erweiterung des wahrgenommenen Raumes gut erforscht. Bis vor Kurzem war offen, ob zum Beispiel nicht nur die Anpassung der gezeigten Wegstrecken (z.B. hier die bereits gekrümmten virtuellen Wege) eine solche zusätzliche Verstärkung des nicht-wahrnehmbaren Curvature-Gains ermöglichen, sondern sich die Nutzer vielleicht auch an Curvature-Gains gewöhnen können. Neueste Forschungen von Bölling und Kollegen (2019) haben einen möglichen Gewöhnungseffekt an die klassischen Curvature-Gains vorgestellt, die ebenfalls zu einer Vergrößerung der nicht-wahrnehmbaren Curvature-Gains führen könnte. Die Grundlagen und Grenzen dieser Adaptationseffekte sind das Thema dieser Arbeit.

## **Adaptation in der Forschung**

Adaptation ist ein psychologisches Phänomen, dass im Wesentlichen die Gewöhnung an einen dargebotenen Reiz ausdrückt. So ist z.B. die perzeptuelle Adaptation an Licht alltäglich zu beobachten, wenn wir in einen dunklen Raum treten und sich unsere Augen an die Lichtverhältnisse „gewöhnen“. Eine Vielzahl neuronaler Prozesse wurde inzwischen identifiziert, die diese Gewöhnung in Teilen messbar machen und so auch als Werkzeug zur Untersuchung der zugrunde liegenden Prozesse nutzbar macht (Kitazaki, 2013). Wichtig ist, dass die sensorische Adaptation von der Habituation und der Ermüdung abgegrenzt wird. Bei der sensorischen Adaptation wird der Reiz, beispielsweise das wenige Licht im dunklen Raum nach kurzer Zeit stärker, bzw. wenn man von einem dunklen in einen hellen Raum wechselt, schwächer wahrgenommen. Für die Habituation und die Ermüdung ist die Reizspezifität, sowie die Reaktion auf den Reiz von zentraler Bedeutung. So kann beispielsweise ein gleichbleibender akustischer Ton nach einer Habituation, nicht mehr bewusst wahrgenommen werden, ein Wechsel des Tons würde sich jedoch wieder bemerkbar machen. Eine Ermüdung läge vor, wenn unsere auditive Wahrnehmung reizunspezifisch vollständig ausgesetzt wäre und wir den Wechsel nicht bemerken. Bei der Habituation würde im Gegensatz zur sensorischen Adaptation, die Reizantwort als Unterscheidungsmerkmal fungieren. So könnte der Wechsel des Tons eine Schreck-Reaktion auslösen, die bei wiederholter Darbietung abnimmt. Bei der sensorischen Adaptation ist die Kopplung an die Reizantwort nicht relevant. (Pfalz, 1983; Clifford et al. 2007; Kohn, 2007, Kitazaki, 2013).

Die sensorische Adaptation beeinflusst also unabhängig von der genauen Reiz-Art und der zuvor geäußerten Reizantwort, die Reizverarbeitung im Gehirn (Clifford et al. 2007). Durch die Untersuchung der Auswirkungen, die die sensorische Adaptation beispielsweise auf bestimmte Bewegungen hat, können Verarbeitungsmechanismen im Gehirn näher erforscht werden. So können bestimmte Bewegungen durch Adaptation je nach Reiz-Art bzw.

-Stärke unterschiedlich beeinflusst werden. Dies lässt Rückschlüsse darüber zu, ob bestimmte Bewegungen auf Grundlage der gleichen Reizverarbeitungsmechanismen ausgeführt werden oder nicht. Adaptation ist dabei häufig mehr als ein Prozess, der eine Art Fehlerkorrektur-Term in die sensorische Verarbeitung einbringt. Vielmehr führt Adaptation dazu, dass Bewegungen und andere Reizreaktionen maßgeblich in ihrer Art und Stärke beeinflusst werden (Bastian, 2008).

Diese Interaktion von Adaptationsprozessen mit motorischen Systemen ist zentraler Bestandteil vieler Forschungszweige und wurde beispielsweise für Augenbewegung intensiv erforscht (z.B. Pélisson, 2010).

Für Augenbewegung, die als Modell für motorische Adaptation einen starken Zusammenhang zwischen Bewegungsplanung und Feedback hinsichtlich des Erfolges oder Misserfolges der Bewegungsplanung bietet, gibt es verschiedene Modelle zum Ablauf einer Adaptation. Führt man Bewegungen häufiger durch und stimmen die sensorischen Informationen nach oder während der Bewegung nicht mit den Erwarteten überein, wird die Ausführung der Bewegung anhand des Feedbacks angepasst (d.h. die Sakkade zum Ziel war am Ende zu kurz, da das Ziel während der Sakkade versetzt worden ist). So konnte beispielsweise für die motorische Adaptation von Sakkaden-Bewegungen noch 19 Tage nach der Adaptation ein Effekt gemessen werden (Alahyane & Pélisson, 2005).

Tseng und Kollegen (2007) untersuchten beispielsweise Adaptation, wenn Greifbewegungen zu einem Ziel, direkt während des Verlaufs der Bewegung, nicht planungsgemäß durchgeführt werden konnten, d.h. sich bspw. die Position des Ziels während der Bewegung verändert. Ähnlich wie die bei der Sakkadenadaptation, haben die Autoren auf diese Weise eine Divergenz zwischen der geplanten Bewegung und dem Ziel der Greifbewegung eingeführt. Die geplante Bewegung führte aufgrund der Manipulation nicht mehr zum gewünschten Ziel. Für diese wahrgenommene Zielverfehlung wurde dann bei

zukünftigen Bewegungsplanungen systematisch korrigiert. D.h. Greifbewegungen führten nach der Adaptation, wenn die Manipulation während der Bewegung ausgesetzt worden ist, zu einem Verfehlen des Zieles, da noch die Bewegung an den zuvor eingeführten Fehler adaptiert worden ist.

### **Adaptation und Laufen**

Hatada und Kollegen (2005) zeigten, dass das einmalige längere (75min) Tragen und Laufen mit einer Prismenbrille, die das Sichtfeld der Testperson um einen nicht-wahrnehmbaren Winkel seitlich verschiebt, die Zeigegenauigkeit der Probanden beeinflusst. So konnte noch nach 6 Tagen eine Verschiebung des Geradeaus-Zeigens im Dunkeln gemessen werden. D.h. die Testpersonen haben nach sensorischer Adaptation an die Verschiebung durch die Prismen-Brille, eine entsprechend verschobene Zeigebewegung nach „Vorne“ ausgeführt. In einer späteren Studie (Hatada et al., 2006) trennten die Autoren die, als motorisch zu bezeichnende, Zeigebewegung von der rein visuell-wahrgenommenen Einschätzung, wo die Geradeaus-Richtung liegt. D.h. für das Zeigen im Dunkeln in Geradeaus-Richtung ergab sich ein messbarer Nacheffekt auch 7 Tage nach der Adaptations-Sitzung. Zur visuellen Einschätzung der Geradeaus-Richtung wurde eine LED vor der Testperson im Dunkeln von links nach rechts bewegt. Statt eine Bewegung auszuführen, könnten die Testpersonen so über das Stoppen der LED, an der für sie als geradeaus wahrgenommenen Position, eine Antwort abgeben. Hier zeigte sich ein Nacheffekt lediglich für zwei Stunden. Auch hier hat eine Adaptation stattgefunden, die jedoch in der reinen visuellen Wahrnehmung einen weniger starken und kürzeren Effekt hatte.

Ähnliche Nacheffekte, die nach dem Laufen mit einer Prismenbrille auftreten, wurden auch für Greifbewegungen und Laufwege, das heißt bogenförmig gekrümmte Laufstrecken gefunden (Kitzawa et al., 1997; Morton et al. 2004; Alexander et al. 2016; Bodenheimer et al.

2017). Das Tragen von Prismen beim Gehen erzeugt außerdem eine gekrümmte Laufstrecke, ähnlich wie Curvature Gains in virtuellen Umgebungen (Morton et al., 2004). Saunders & Durgin (2011) übertrugen die Effekte der Prismenbrille in VR und untersuchten die Adaptation an eine konstante Orientierungsverschiebung zwischen physischer und virtueller Laufrichtung während des Gehens. Sie fanden heraus, dass eine Verschiebung von 10 Grad zwischen physischer und virtueller Richtung für die Teilnehmer nicht wahrnehmbar war und dass die Teilnehmer in einer Kurve gingen, wenn sie versuchten, eine gerade Linie zum Ziel zu gehen. Nach einer kleinen Anzahl von Versuchen mit dieser Verschiebung kompensierten die Testpersonen diese konstante Verschiebung liefen wieder geradere-aus. In einer VR-Studie stellten Bruggeman und Warren (2010) fest, dass sich die Adaptation für das Laufen mit einem konstanten Versatz, spezifisch für die Laufbewegung äußerte, sich aber nicht auf andere Aufgaben bspw. Greifbewegungen mit Versatz übertrug. Die Testpersonen müssen also für unterschiedliche Arten von Bewegungen, spezifisches visuelles Feedback mit dem konstanten Versatz erhalten. So scheinen hier zum Beispiel für Greifbewegungen andere Bewegungskorrekturmechanismen zu wirken als für die Laufbewegungen.

Wir beobachten also, unterschiedliche Auswirkungen der sensorischen Adaptation auf verschiedene Arten von Bewegungen in der virtuellen Realität. Auf Grund der Ergebnisse kann vermutet werden, dass für Übertragungsmanipulationen, im Sinne von Redirected Walking, ebenfalls Adaptationseffekte auftreten. Es müsste so spezifisch für das Laufen in virtueller Realität erforscht werden, wie stark der Effekt einer Adaptation an eine bestimmte Art von Gain ist und welche Stabilität diese Effekte aufweisen.

### **Adaptation in Redirected Walking – Das neue Geradeaus**

Wir (Bölling et al., 2019) zeigten, dass auch für die Wahrnehmungsschwellen von Curvature-Gains eine Adaptation innerhalb einer virtuellen Umgebung beobachtet werden

kann. Wir konnten zeigen, dass eine Verschiebung der Wahrnehmungsschwelle für die Curvature-Gains eintritt, wenn die Testpersonen einen bestimmten Curvature-Gain wiederholt ausgesetzt werden. Bei der Messung zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle wurden unterschiedlich starke Curvature-Gains auf einer Laufstrecke angewandt. Lief die Testperson nun die Strecke ab, konnte er überzufällig genau die Richtung des Curvature-Gains bestimmen, wenn für ihn die gekrümmte Bewegungsstrecke wahrnehmbar war. Zur Adaptionsmessung wurde Schwellenwerte vor und eine nach der einer Adaptation durchgeführt. Dabei ist vor allem der PSE-Wert (*point of subjective equality*, Punkt der subjektiven Gleichheit) der Schwellenwertmessung interessant. Dieser Wert beschreibt im Falle von Curvature-Gains, den Wert der als geradeaus wahrgenommen wird, d.h. zu 50% als „Rechts“- bzw. „Links“- gekrümmt wahrgenommen worden ist.

Hier konnte also durch eine klassische Adaptionsprozedur (wiederholte Darbietung eines Reizes), die Effektivität der Manipulation, im Sinne der Reduzierung der Wahrnehmbarkeit von Curvature-Gains, gesteigert werden. Die Gewöhnung an wiederkehrende Curvature-Gains kann so als Erweiterung der Redirected-Walking-Methoden betrachtet werden. Die Nutzung von virtuellen Umgebungen über einen längeren Zeitraum hinweg und die individuelle Anpassung an mögliche Manipulationen im Sinne von Redirected Walking könnten in die Entwicklung neuer Methoden einbezogen werden.

## **Hypothesen**

Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll sich mit einer Erweiterung der bisherigen Ergebnisse zu Redirected-Walking und Adaptation befassen. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung von Adaptationseffekten über mehrere Tage hinweg in einem wiederkehrenden Szenario. Die Untersuchung soll zeigen, welche Effekte diese Exposition mit einem Curvature-Gain hat. Dabei werden drei Messvariablen untersucht a) die

Wahrnehmungsschwellen (*Threshold*) für bestimmte Curvature-Gains, b) die Geradeaus-Laufbewegung ohne visuelle Referenz (*Heading*) und c) Geradesus-Zeigerichtung (*visual straight ahead, VSA*) der Testperson. Für jede Messvariable soll geprüft werden, ob sich die Messvariablen signifikant durch die Adaptation verändern.

Daraus ergeben sich die folgenden Hypothesen:

- I) Die Adaptation an einen Curvature-Gain führt zu einer direkt messbaren Veränderung zwischen der Messvariablen vor und nach der Adaptation (*Nach-Adaptation - Vor-Adaptation*  $\neq 0$ )
  - a) Curvature-Gains werden nach der Adaptation anders wahrgenommen:
    - i)  $\text{Threshold}_{\text{Nach}} - \text{Threshold}_{\text{Vor}} \neq 0$
  - b) Es lässt sich eine veränderte Lauftrajektorie feststellen:
    - i)  $\text{Heading}_{\text{Nach}} \neq \text{Heading}_{\text{Vor}}$
  - c) Es lässt sich ein verändertes Zeigeverhalten feststellen:
    - i)  $\text{VSA}_{\text{Nach}} - \text{VSA}_{\text{Vor}} \neq 0$
- II) Bestehende Effekte der Adaptationen bleiben auch zu Beginn der Folgemessung erhalten
  - a) Effekte aus Hypothese Ia bleiben auch bis zur nächsten Messung erhalten:
    - i)  $\text{Threshold}_{\text{Vor}(t+1)} - \text{Threshold}_{\text{Vor}(t)} \neq 0$
  - b) Effekte aus Hypothese Ib bleiben auch bis zur nächsten Messung erhalten:
    - i)  $\text{Effekt}_{\text{Heading}(\text{Vor})(t+1)} - \text{Effekt}_{\text{Heading}(\text{Vor})(t)} \neq 0$
  - c) Effekte aus Hypothese Ic bleiben auch bis zur nächsten Messung erhalten:
    - i)  $\text{Effekt}_{\text{VSA}(\text{Vor})(t+1)} - \text{Effekt}_{\text{VSA}(\text{Vor})(t)} \neq 0$
- III) Wiederkehrende Adaptationsprozeduren verstärken die Adaptationseffekte über die Zeit.
  - a) Effekte aus Hypothese Ia verstärken sich über die Zeit
    - i)  $\text{Threshold}_{\text{Nach}(t+1)} - \text{Threshold}_{\text{Nach}(t)} \neq 0$

b) Effekte aus Hypothese Ib verstärken sich über die Zeit

i)  $\text{Effekt}_{\text{Heading}(\text{Nach})}(t+1) - \text{Effekt}_{\text{Heading}(\text{Nach})}(t) \neq 0$

c) Effekte aus Hypothese Ic verstärken sich über die Zeit

i)  $\text{Effekt}_{\text{VSA}(\text{Nach})}(t+1) - \text{Effekt}_{\text{VSA}(\text{Nach})}(t) \neq 0$

ii)  $\text{Effekt}_{\text{VSA}(\text{Nach})}(t+1) - \text{Effekt}_{\text{VSA}(\text{Nach})}(t) \neq 0$

## **Methode**

### **Testpersonen**

Neun Teilnehmer (4 männlich, 5 weiblich,  $M_{\text{Alter}} = 34,78$  ( $SD = 15,87$ ,  $\text{Spanne} = 19-60$ ) nahmen an der Studie bestehend aus fünf Sitzungen teil. Alle Testpersonen hatten normales oder korrigiertes Sehvermögen, in der Vergangenheit keine visuellen oder motorischen Einschränkungen und gaben schriftlich ihre informierte Zustimmung zur Teilnahme an der Studie. Die experimentellen Verfahren wurden von der Ethikkommission der Westfälische-Wilhelms-Universität Münster genehmigt.

### **Technischer Aufbau**

Das Experiment wurde im VR-Labor des psychologischen Instituts der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster in einem Bereich von 10,6 m x 6 m durchgeführt. Die lange Laborseite wurde als X-Achse und die kurze als Y-Achse festgelegt. Mittelpunkt des Labors wurde als Punkt (0/0) festgelegt. Die virtuelle Umgebung wurde auf einem Oculus Rift CV1 Head-Mounted-Display (HMD) mit einem nominalen Sichtfeld von 110° und einer Auflösung von 1080 x 1200 Pixel pro Auge präsentiert. Um eine realistische Umgebung präsentieren zu können ohne spezifische Punkte, die die Erkennung von Rotationsänderung vereinfacht hätten zu geben wurde eine generische Wüsten-Szene genutzt. Die Stimuli wurden mit einem MSI GE63VR 7RF Raider-Notebook mit Unity 2017.4.3f1 präsentiert. Benutzereingaben wurden mit einem Macally Airstick erfasst, der mit zwei LEDs ausgestattet wurde.

Ein ESP8266-Mikrocontroller wurde genutzt, um zwischen Kopf-Leds und Controller-Leds umzuschalten. Dazu wurde über Unity ein selbstgeschriebenes Programm auf dem Mikrocontroller angesprochen, der die Umschaltung zwischen den LEDs am Kopf und am Controller ermöglichte. Der Hardware-Aufbau ist in Abbildung 1 c) und d) näher spezifiziert.

Das genutzte optischen Tracking-System (Precise Position Tracking (PPT) von WorldViz) konnte so entweder die Kopfposition oder die Position des Controllers im Raum bestimmen, indem zwischen den entsprechenden LEDs umgeschaltet worden ist. Während der Messungen trugen die Teilnehmer einen Rucksack, in dem das Notebook und zwei zusätzliche Batterien mitgeführt wurden. Der Versuchsleiter war in der Lage, das Experiment über eine Remote-Desktop-Verbindung zum Notebook via W-Lan zu überwachen. Die Kopfposition wurde vom PPT mit einer Aktualisierungsrate von 90 Hz auf einem Computer (Dell Dimension 8300 mit einem Intel Pentium 4 CPU mit 2,8 GHz und 240 MB RAM unter Microsoft Windows XP Home Edition (SP1)) mit der Software PPT Studio von WorldViz (Version 3.21.5791) mit vier Kameras verfolgt. Die rohen Positionsdaten von zwei LEDs, die im Abstand von 40 cm am HMD befestigt waren, wurden über W-Lan an das Notebook im Rucksack gesendet. Sie wurden dann mit einem VRPN-Plugin in die VR-Software importiert. Die Position des Kopfes wurde als Mittelwert der beiden LED-Positionen berechnet, wobei diese dabei zunächst für die Abstände der LEDs relativ zum HMD korrigiert wurden. Dieses Signal wurde dann mit einem Kalman-Filter (Welch & Bishop, 1995) gefiltert, um die Positionierungsdaten im Raum zu glätten.

Wenn die Position von nur einer oder von keiner LED erfasst werden konnte, wurde das Experiment angehalten und eine rote Maskierung in der VR-Szene erschien. Abbildung 1 zeigt in c) und d) den genauen Aufbau der LED-Tracking-Gestelle und in b) tracking-spezifischen VR-Szenen-Maskierung. Abbildung 1 a) gibt zeigt die Testperson mit der Hardware im Labor.

Jedes Mal, wenn die beiden LED-Positionen aktualisiert wurden, überprüfte ein Filter, ob der Abstand zwischen den beiden LEDs weniger als 60 cm betrug, um fehlerhafte Tracking-Daten auszuschließen. Wenn dies der Fall war, wurde das Experiment angehalten und die rote Maske erschien, bis die LEDs wieder korrekt erfasst wurde. Falls eine Position

erreicht wurde, die näher als 30 cm an den Wänden des VR-Labors lag, erschien in der virtuellen Umgebung ein Zaun (s. Abbildung 1 b) ), der die echten Dimensionen des Raumes anzeigte, um zu verhindern, dass die Testpersonen gegen die Laborwand liefen.

Die Orientierung des Kopfes wurde durch das HMD erfasst und in jedem Durchgang mit dem PPT synchronisiert.

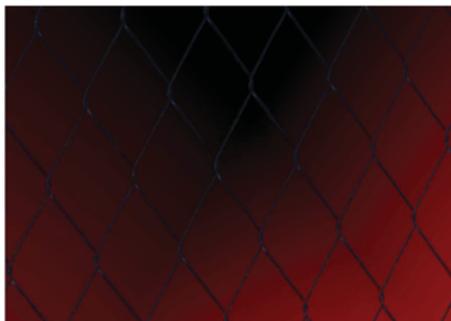
a)



c)



b)



d)



*Abbildung 1.* Tracking-Hardware an der Testperson. a) Testperson während des Experiments mit Controller, HMD und Rucksack und laufend im Labor b) Anzeige im HMD bei Tracking-Verlust: Wenn die Positionsdaten der HMD-LEDs nicht gemessen werden konnte, wurde eine rote Maske und der Begrenzungszaun in der virtuellen Umgebung angezeigt, c) Controller mit LED-Aufbau (LEDs mit 40cm Abstand), c) HMD mit LED-Aufbau (ebenfalls 40cm Abstand der LEDs). Hier wurde auch der Mikrocontroller verbaut. Die LEDs am Controller waren mit dem Mikrocontroller am HMD verbunden. Per Webserver, der auf dem Mikrocontroller lief, konnten über W-LAN die LEDs umgeschaltet werden (Controller-LEDs an und HMD-LEDs aus oder Controller-LEDs aus und HMD-LEDs an)

## Versuchsdurchführung

Tabelle 1

Experimentaufbau und Session-Ablauf

Blockposition		Block	Trials	Session-Nummer (Tage seit Beginn der Messungen)					
				1 (0)	2 (1)	3 (2)	4 (4)	5 (11)	
VOR VR		-	SSQ PRE	-					
VR-EXPERIMENT	Vor-Adaptation	1	VSA+HEADING	3	Hypothese I	Hypothese II			
		1	THRESHOLD	63					
		2	VSA+HEADING	3					
	Adaptation	1	ADAPTATION	90		Hypothese I	Hypothese I	Hypothese I	Hypothese I
	Nach-Adaptation	3	VSA+HEADING	3		Hypothese III			
		2	THRESHOLD	63					
		4	VSA-HEADING	3					
NACH VR	Nach-Adaptation	-	SSQ POST + SUS	-					

*Hinweise:* Auf der linken Seite der Tabelle wird der Ablauf einer Session dargestellt. Die rechte Seite gibt die entsprechenden Hypothesen in Abhängigkeit zu den Messzeitpunkten an. Hypothese 1 wurde entsprechend nur innerhalb jeder einzelnen Session geprüft (Vergleich Vor-Adaptation und Nach-Adaptation), Hypothese II betrachtet die Veränderung der Vor-Adaptations-Blöcke über die Messzeitpunkte hinweg und Hypothese III entsprechend die Nach-Adaptationsblöcke.

Jede der fünf Sitzungen bestand aus einer Abfolge von vier unterschiedlichen Blocktypen. Eine Übersicht über die Abfolge der Sitzungen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Inhalte der einzelnen Blöcke werden im Folgenden erläutert.

## Blöcke

### Geradeaus-Zeigen (VSA)

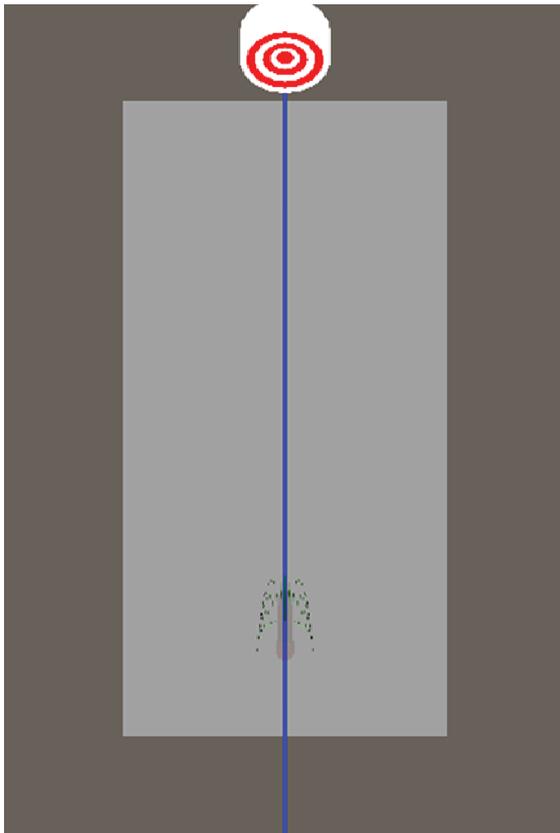
In diesem Teil des Experiments mussten sich die Testpersonen zu einer transparenten Säule in der virtuellen Umgebung begeben, um ihre Startposition einzunehmen. Ein Ton wurde abgespielt, wenn die richtige Position der Testperson auf dem Punkt (-3/0) zur Ausführung der Zeigebewegung im Labor erreicht worden ist. Anschließend erschien in der virtuellen Umgebung eine Zielscheibe in 8 Metern Entfernung auf dem Punkt (5/0) im virtuellen Koordinaten-System. Die Testpersonen waren nun instruiert eine Zeigebewegung mit dem Controller durchzuführen. Über die Mikrocontroller-Steuerung wurden die LEDs am HMD ausgeschaltet und die Controller-LEDs eingeschaltet. Die Übertragung der Positionsdaten wurde während dieser Zeit unterbrochen, sodass die Orientierung des Kopfes, gemessen durch das HMD, noch in die virtuelle Szene übertragen worden ist, die Kopfposition aber fixiert war. Es wurde keinerlei Informationen über die Armposition in der VR-Szene dargestellt. Die Testpersonen richteten den Controller in Richtung des Ziels aus. Sobald die LEDs des Controllers vom PPT gemessen werden konnten, wurde ein Nachladegeräusch abgespielt. Die Testpersonen konnten nun den Abzug am Controller drücken, um mit Ihrer *unsichtbaren Waffe* auf das Ziel zu *schießen*. Die Testperson erhielt also kein Feedback zur Genauigkeit der Zeigebewegung. Ein Schussgeräusch wurde abgespielt und das Ziel verschwand. Im gleichen Moment wurden die LEDs erneut umgeschaltet und die Kopfposition wurde wieder in die VR-Szene übertragen, um in den Block *Geradeaus-Laufen* überzugehen. In Abbildung 2 a), b) und c) sind die wesentlichen Bestandteile der VSA-Szene abgebildet.

### Geradeaus-Laufen (Heading)

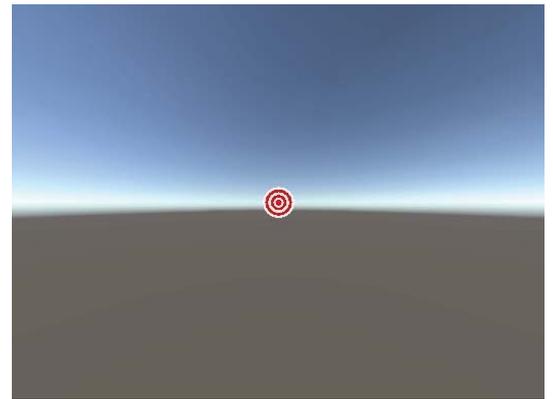
Als nächstes musste die Testperson in Richtung des Ziels laufen, das im VSA-Block zuvor ausgeblendet worden ist. Wie in Abbildung 2 d) zu sehen, wurde der Testpersonen

dabei keine visuellen Informationen über die konkrete Richtung ihrer Bewegung gegeben, um die konkrete physische Bewegungsrichtung für die Testpersonen zu verschleiern. Das Laufen in dieser Bedingung war also vergleichbar mit blinden Laufen oder mit Laufen in einem vollständig dunklen Raum. Nach 5,75 m erschien ein Pfeil, der anzeigte, sich umzudrehen und zu der durchsichtigen Säule (auf Position (-3,0)) zurückzugehen. Die Durchgänge von VSA und Heading wurden je aufeinanderfolgend ausgeführt, sodass nach jeder Zielaufgabe auch eine Laufaufgabe durchgeführt wurde. Beim letzten Trial der beiden zusammenhängen Blöcke VSA und Heading wurde diese Säule auf Position (3;0) also am Ende Laufstrecke präsentiert. Durch Betreten der Säule wurden die Testpersonen je nach Blockposition in die Adaptation-Szene oder in die Threshold-Szene geleitet. Abbildung 2 d) und e) zeigt die wesentlichen Elemente der Heading-Szene, die der Testperson präsentiert wurden.

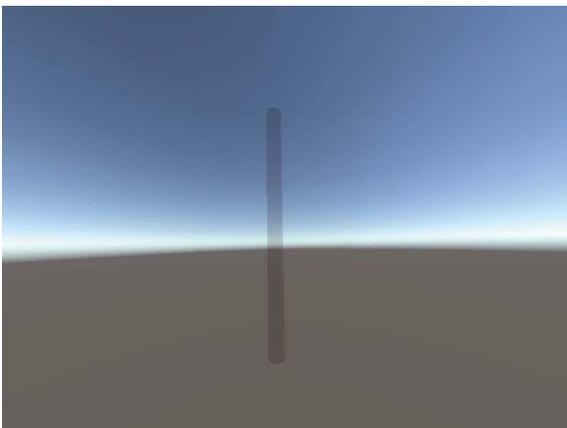
a)



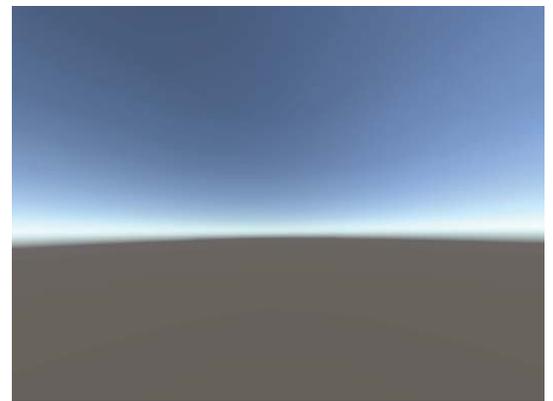
c)



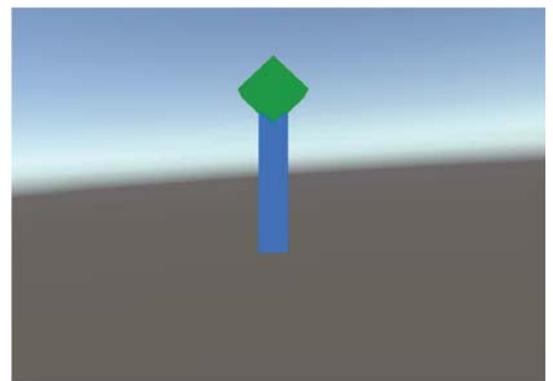
b)



d)



e)



*Abbildung 2.* Aufbau des VSA-Heading-Blocks. a) Ansicht des Blocks aus der Vogelperspektive: die blaue Linie entspricht der X-Achse des Labors. Rechts von der Linie befinden sich die positiven Y-Werte. Das Ziel befindet sich auf der virtuellen Position (5.25;0), die Säule befindet sich auf der Position (-2,75;0), b) Startsäule für den VSA+Heading-Trial: Testpersonen mussten sich auf die Säule stellen und in die Richtung der erscheinenden Zielscheibe ausrichten, c) Zielscheibe vor der Testperson: Die Testperson musste nun mit dem Controller auf die Zielscheibe zielen und feuern. Es gab kein visuelles Feedback während des Zielvorgangs, d) Ansicht der Heading-Szene während der Laufphase: Nach dem Schuss mussten die Testpersonen in Richtung des ausgeblendeten Zieles laufen. Die Szene gab keine Referenz über die Richtung, in die sich die Testperson bewegte, e) Stop der Laufphase: Ein Pfeil zeigte der Testperson an, dass Sie die Laufphase beenden sollten und sich wieder umdrehen sollten. Sie konnten nun wieder die Start-Säule aus b) sehen und sich wieder zum Trialbeginn begeben.

### **Threshold-Messung (Threshold)**

Zum Beginn des Threshold-Blocks wurden den Testpersonen eine Wüsten-Szene präsentiert (s. Abbildung 3 a) und b)). Die Threshold-Trials begannen jeweils auf Position (2.75,0) bzw. (-2.75,0) und die Bewegungsrichtung der Testpersonen sollte jeweils zur gegenüberliegenden Seite sein. Betrachtet die Testperson, den durch eine Säule gekennzeichneten Startpunkt, wurde für 500 ms die Szene ausgeblendet (graues Bild) und die Szene entsprechend der im nächsten Abschnitt besprochenen Curvature-Gain-Manipulation gedreht. Vor der Testperson erschien ein schmaler weißer Pfad und rückwärtig (also an der Laborgrenze) ein begrenzender Baum, der verhindern sollte, dass Probanden versehentlich den Tracking-Bereich verließen (Abbildung 3 a) und b)). Am Ende des Pfades wurde eine durchsichtige Säule präsentiert, die als Laufziel für die Testpersonen fungierte. Nun musste die Testperson in Richtung des Ziels laufen. Die Testpersonen wurden instruiert bestmöglich Geradeaus zum Ziel zu laufen. Während der Laufphase wurde der Curvature-Gain auf die Szene angewandt. Zur Threshold-Messung wurden insgesamt sieben verschiedene Gains mit je 9 Trials pro Gain in einer zuvor randomisierten Reihenfolge, die auch in jedem Threshold-Block für jeden Probanden gleich war, gemessen. Die genauen Curvature-Gains werden im folgenden Abschnitt erläutert. Nach Erreichen der Säule erschien ein kopffixiertes Entscheidungsmenü innerhalb der virtuellen Umgebung. Hier musste eine Entscheidung über Richtung des zuvor gelaufenen Gains getroffen werden („In welche Richtung wurden Sie abgelenkt?“). Abbildung 3 zeigt eine Übersicht des Szenenaufbaus. Die Antwort wurde mit den Tasten des Macally Airsticks eingegeben. Nach der Antwort wurde ein Ton abgespielt, und ein neuer Threshold-Trial begann. Die Testpersonen mussten sich umdrehen und sich auf die Startposition für den Trial begeben und wieder zur gegenüberliegenden Säule laufen. Dabei wurden für jeden Threshold-Block die Anzahl der „Rechts“ bzw. „Links“ antworten abgespeichert. Nach Ende aller Threshold-Trials verschwand die Wüsten-Umgebung und der VSA-Heading Block begann.

*Curvature-Gain*

Wie in Bölling et al. 2019 festgestellt, konnte im gleichen Versuchsaufbau eine Adaptation im Sinne einer PSE-Verschiebung nach der ersten Sitzung festgestellt werden. Daher wurden in Session 1, die in der Threshold-Messung verwendeten Gains so gewählt, dass Sie symmetrisch um 0 (Kein Gain) gemessen wurden und in den folgenden Session ein Bereich weiter rechts gemessen, d.h. durch die möglicherweise andauernde Adaptation auch größere positive Gains unterscheidbar gemessen werden konnten. Die verwendeten Gains können aus der *Tabelle 2* entnommen werden.

Tabelle 2

*Curvature-Gains, Radien und Messzeitpunkte*

$gC$ (m <sup>-1</sup> )	$-\pi/15$	$-\pi/30$	$-\pi/60$	0	$+\pi/120$	$+\pi/60$	$+\pi/40$	$+\pi/30$	$+\pi/15$
Radius (m)	-4,77	-9,55	19,10	$\infty$	38,20	19,10	12,73	9,55	4,77
Session 1	X	X	X	X		X		X	X
Session 2-5		X		X	X	X	X	X	X

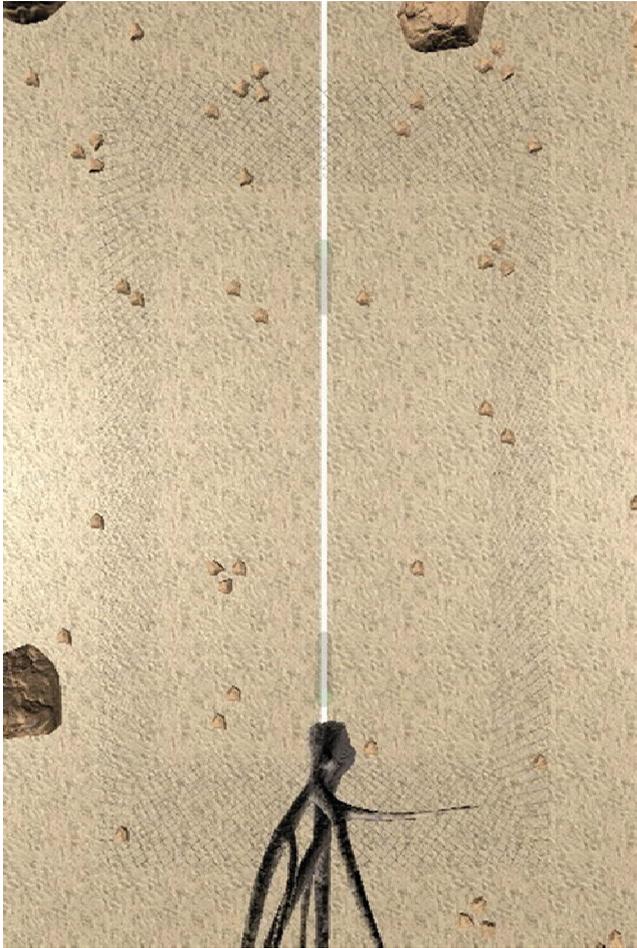
*Vermerk:* Es werden alle gemessenen Curvature-Gains und korrespondierenden Radien dargestellt. In Session 1 wurden die Gains symmetrisch um 0 in der Threshold-Messung verwendet. In Session 2-5 wurden Gains weiter „rechts“ für die Threshold-Messung verwendet.

Um sicherzustellen, dass die Start- und Endpositionen der Testpersonen für jeden Versuch auf der Mittellinie des Labors lagen, verwendeten wir einen Algorithmus mit konstanten Curvature-Gains. Der Drehwinkel der virtuellen Umgebung  $\alpha$  änderte sich entsprechend der angewandten Verstärkung mit einem Radius  $r$ , der Drehwinkel der Testpersonen laut HMD  $\gamma$  und dem Abstand zwischen der Testperson und dem Ursprung des Kreises, der den auf die die VE angewandten Drehwinkel  $\alpha$  definiert:

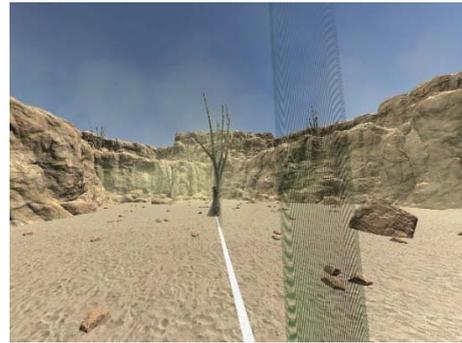
$$\alpha = \gamma + \frac{180}{\pi} * \text{Acos} \left( \frac{x^2 - r^2 - a^2}{-2|r|a} \right)$$

Der Algorithmus führte so dazu, dass die Testperson bei jedem Trial mit angewandten Curvature-Gain mit einem Winkel  $\alpha$  zur Mittellinie starteten und entsprechend am Ende jedes Trials im umgekehrten Winkel zur Mittellinie endeten. Die virtuell als Geradeaus empfundene Laufstrecke entsprach im physischen Raum also einer Kreisstrecke, wenn der Gain nicht 0 war. Die Kreisstrecke durchlief den Start und Endpunkt des Trials. Dieser Kreis hatte den durch den Gain definierten Radius. Durch die kurzen grauen Maskierungen innerhalb der Adaptationsblöcke, bzw. innerhalb der Threshold-Messung sollte vermieden werden, dass die Drehung der Umgebung zu Beginn des Trials, entsprechend der Formel oben, von der Testperson konkret festgestellt werden konnte (Suma et al., 2012). Dieses Vorgehen hatte den Vorteil, dass beliebige unterschiedliche Gains sowohl beim Hin- als auch beim Rückweg auf die Strecke angewandt werden konnten und die Testperson trotzdem immer auf der Mittellinie des Labors endete.

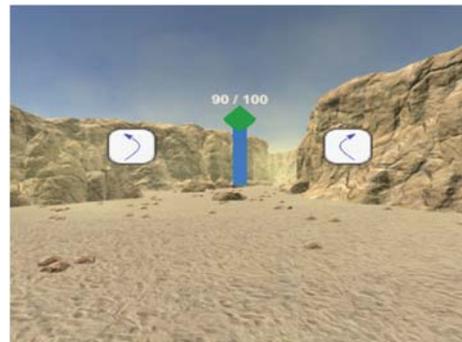
a)



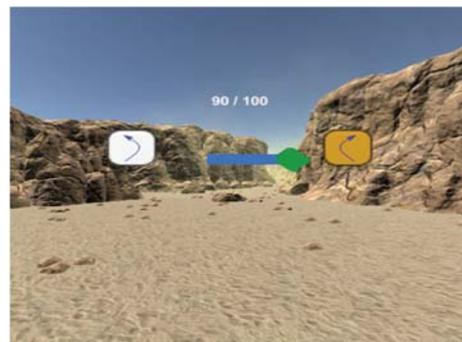
b)



c)



d)



*Abbildung 3.* Threshold- und Adaptationsszene. a) Vogelperspektive der Wüsten-Szene: Probanden mussten während der Threshold- und Adaptationstrials auf dem Pfad weg vom Baum in der Szene laufen, b) Rückblick aus Testperson-Perspektive: Probanden mussten von der Säule am Baum zur gegenüberliegenden Seite laufen. Die Szene wurde am Ende jedes Trials so gedreht, dass der Baum wieder hinter der Testperson erschien und sie in die entgegengesetzte Richtung einen weiteren Trial laufen konnte. c) Auswahlmenü für die Threshold-Messung: Die Testperson mussten am Ende eines Threshold-Trials mit dem Controller eine Einschätzung geben, wie sie beim Laufen „abgelenkt“ worden sind. Der linke Pfeil entsprach einer Ablenkung auf einem Kreisbogen nach links und der rechte Pfeil einem Kreisbogen nach rechts. Die angegebene linke Punktzahl war ein Prozentwert für die Genauigkeit, die der Trial entsprechend des Curvature-Gains gelaufen worden ist. Die rechte Punktzahl war die Summe dieser Punkte über alle bisherigen Trials. d) Nutzung des Auswahlmenüs: Mit dem Controller konnte einer der Pfeile ausgewählt und die Antwort bestätigt werden. Nach der Bestätigung wurde die Szene kurz ausgeblendet (graue Maskierung) und ein neuer Trial begann.

### Adaptation

In 90 Trials mussten die Testpersonen während des Adaptationsblocks den weißen Pfad entsprechend der Aufgabe im Threshold-Block ablaufen. Während dieses Blocks wurde

statt wie im Threshold wechselnde Curvature-Gains immer ein konstanter Curvature-Gain von  $\frac{\pi}{30}$  bei jedem Trial angewandt. Außerdem wurde kein Entscheidungs Menü präsentiert.

Ansonsten liefen die Testpersonen, wie im Threshold-Block auch virtuell geradeaus. Nach Erreichen des Ziels drehten sie sich um und es begann ein neuer Trial in die entgegengesetzte Richtung. Durch den begrenzenden Baum am Pfad und die Zielsäule wussten die Testpersonen immer in welche Richtung, der Trial absolviert werden musste. Das Ende der Adaptation verlief analog zum Threshold-Block. Der Aufbau der Szene entsprach im Wesentlichen dem Aufbau der Threshold-Szene (s. Abbildung 3).

### **Fragebögen**

Zu Beginn und am Ende jeder Session wurde der SSQ (Simulator-Sickness-Fragebogen, Kennedy et al., 1993) erhoben. Nach jeder Session wurde zudem der SUS (Slater-Usoh-Steed-Fragebogen zur Ermittlung des Präsenzgefühls in der virtuellen Umgebung, Usoh et al., 2000) ausgefüllt.

### **Ablauf**

Das Experiment bestand aus 5 Sitzungen mit je identischem Ablauf. Die Testpersonen wurden an insgesamt 5 Tagen gemessen und durchliefen dabei immer den gleichen Versuchsablauf. Die Messungen fanden an den Tagen 0, 1, 2, 4 und 11 relativ zum ersten Messtag statt.

Nach allgemeinen Informationen über das Experiment und dem Ablauf einer Sitzung am ersten Messtag (Sitzung 1) starteten die Testpersonen jedes Mal mit dem Ausfüllen des SSQ-Fragebogens. Den Testpersonen wurde dann der Rucksack umgehängt und die VR-Brille aufgesetzt. Über eine Remotedesktop-Verbindung wurde die Initialkalibrierung zwischen Oculus-Orientierungssensor und dem PPT-Koordinatensystem durchgeführt. Dann startete der VR-Teil des Experiments. Der genaue Ablauf und Aufbau jeder Session, kann der linken Seite der Tabelle 1 entnommen werden.

Bei technischen Problemen konnte eine Rekalibrierung durchgeführt werden oder das Experiment an der Stelle des Fehlers neugestartet werden, ohne dass die Testperson die VR-Hardware ablegen musste.

## **Auswertungsmethoden**

### **Analyse-Software**

Statistische Tests und Plots wurden mit der R-Version 3.4.2 (R Core Team, 2020) durchgeführt. Zur Modellierung von gemischten linearen Modellen wurde das Paket lme4 (Bates et al., 2015) genutzt. Für die Threshold-Berechnungen und die Erstellung der entsprechenden Grafiken wurde Matlab 2019b (MATLAB, 2019) genutzt.

### **Auswertung der Threshold-Messungen**

Zur Analyse der Threshold-Messung wurden die aufgezeichneten „Rechts“- bzw. „Links“-Antworten für jeden Gain pro Threshold-Block pro Person aggregiert. Dabei wurde die prozentuale Häufigkeit von Rechtsantworten berechnet. Für die Schwellenwertberechnung wurden nun logistische psychometrische Kurve für alle Probanden mit Hilfe des psignifit4-Pakets (Schütt, Harmeling, Macke, & Wichmann, 2016) für Matlab an die Threshold-Antworten jedes Threshold-Blocks jeder Session gefittet. Erwartet wurde, dass für besonders negative Gains 0% Rechtsantworten vorliegen sollten und für besonders positive Gains 100% rechtsantworten vorliegen sollen. Es wurden entsprechend der Implementation des psignifit4-Pakets eine sigmoidale Funktion an die jeweiligen Daten angepasst. Für die weitere Auswertung wurde anhand dieser gefitteten Funktionen der Gain ermittelt, der dem Fit nach eine 50% Wahrscheinlichkeit für eine „Rechts“- bzw. „Links“-Antwort (PSE) ergab.

Zusätzlich wurden diese Fits und die jeweiligen Daten mit Matlab geplottet.

### **Auswertung der Heading-Messungen**

Zur Analyse der Laufstrecke wurde eine Kreis-Fit-Funktion entwickelt. Dadurch konnte die Laufstrecke der Probanden als eine Reihe von Punkten mit den Koordinaten (X, Y) dargestellt werden. Es wurden die Positionsdaten der Testperson nach Abgabe des Schusses im VSA-Teil bis zum Erreichen des Ziels verwendet. Für die Fits wurde davon ausgegangen, dass die so entstandene Laufstrecke ein Teil eines Kreises K ist, bei dem der Start-(S) und der Endpunkt(E) der Laufstrecke L den Kreis K schneiden. K wird definiert durch den Mittelpunkt des Kreises M und einem Radius r. Um für jeden Heading-Durchgang der Testpersonen den Kreis K zu ermitteln, dessen Kreisbogen möglichst genau auf den Bewegungsdaten liegt, wurde wie folgt verfahren:

Um zu ermitteln, ob ein passender Kreis eher links (nach links gebogene Laufstrecke) oder eher rechts (nach rechts gebogene Laufstrecke) lag wurde zunächst ein lineares Modell an die Positionsdaten des Trials angepasst. Wenn die durch das lineare Modell beschriebene Regressionsgerade nach rechts oben zeigte, also eine positive Steigung aufwies, wurde von einem Kreismittelpunkt von der Testpersonen aus auf der rechten Seite ausgegangen, und umgekehrt. Es wurde weiter angenommen, dass die durch das Lineare-Modell definierte Regressionsgerade orthogonal zum Radius verläuft. Eine Orthogonale O zur Regressionsgerade zur mittleren X-Position zwischen S und E sollte daher den Kreismittelpunkt M schneiden. Unter Berücksichtigung dieser Annahmen wurde der Suchbereich für den Mittelpunkt M und den Radius r so eingeschränkt, dass es möglich war für jede Laufstrecke einen Kreisbogen zu finden, der möglichst genau auf den Trackingdaten des Laufdurchgangs lag. Die verschiedenen im Suchbereich untersuchten Kreise wurden anhand des mittleren quadratischen Fehlers zu den Punkten im Laufbereich verglichen und

der Kreis mit dem kleinsten mittleren quadratischen Fehler ausgesucht. Eine schematische Darstellung des Algorithmus findet sich in Abbildung 4.

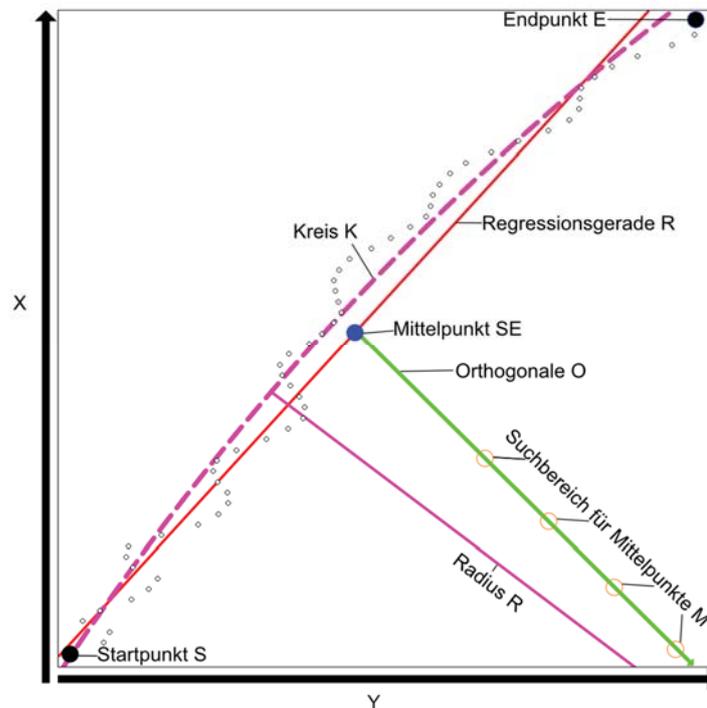


Abbildung 4. Schematische Darstellung des Kreisfit-Algorithmus. Abgebildet sind die Positionsdaten eines Heading-Trials. Durch die Punkte wurde eine Regressionsgerade R gelegt. Es wurde der Mittelpunkt SE dieser Regressionsgeraden zwischen den Punkten S und E bestimmt. Die Orthogonale O zu R am Punkt SE war der Suchvektor für den möglichen Kreismittelpunkt M. Es wurde für jedem möglichen Mittelpunkt M ein passender Bereich für den Radius R überprüft, indem die Abweichungsquadrate des dadurch definierten Kreises K zu den Laufpunkten berechnet worden ist. So konnte ein optimaler Kreis K mit Mittelpunkt M und Radius R für die Laufstrecke bestimmt werden. (Für die Heading-Trials wurde die Suche bei einem Radius von 202 m abgebrochen. Der Trial musste dann als geradeaus gelaufen gewertet werden.)

### Auswertung der VSA-Messungen

Für die Auswertung der Zeigewinkel wurden alle VSA-Durchgänge mit einem verfügbaren Tracking-Punkt zum Zeitpunkt des Betätigens des Kontrollers (*Schuss auf Ziel*) und des ersten verfügbaren Punkts danach herangezogen. Jede Punkt-Kombination die einen Vektor in Richtung des Zieles von der Testperson aus aufspannte und sich in einem Sichtbereich von 180 Grad vor der Testperson (in Richtung der Zielscheibe) befand, wurde als Datenpunkt verwendet. Der Winkel aus dem gültigen Vektor der beiden Punkte der Controller-LEDs und der Kopf-LEDs relativ zur Mittellinie des Labors wurde berechnet und

als Winkel für den VSA-Durchgang gesetzt. Positive Winkel korrespondierten daher mit einem „Zielen“ nach rechts, negative nach links.

## Ergebnisse

Im Fokus dieser Arbeit soll die Auswirkung der Adaptation an den Curvature-Gain  $\frac{\pi}{30}$  auf die drei vorgestellten Messdimensionen sein. Es werden zur Einordnung daher zunächst die allgemeinen Daten zu den Adaptationsblöcken und dem Sitzungsverlauf vorgestellt.

### Adaptation

Um die folgenden Ergebnisse korrekt einordnen zu können, wurden die gelaufenen Adaptationstrials näher untersucht. Hierzu wurde jeder Adaptationstrial mit der beschriebenen Kreisfitmethode untersucht und geprüft, ob der gewünschte Kreis gelaufen worden ist.

Ziel war es, die Testpersonen auf eine Kreisstrecke mit dem Radius 9,75 m (entsprechend des Gains:  $(gC)^{-1} = \left(\frac{\pi}{30}\right)^{-1} \approx 9,75 \text{ m}$ ) zu führen. Dabei sollten die Versuchspersonen den Start und Endpunkt der Adaptationstrials durchschreiten und sich dabei auf dem entsprechenden Kreisbogen bewegen. Zum Fit der Daten wurde eine angepasste Version des Kreisfit-Algorithmus der Heading-Auswertung verwendet, in dem der Start- und Endpunkt auf den Start- bzw. Endpunkt des Adaptationsblocks fixiert worden ist, statt diese über ein lineares Modell aus den Daten zu ermitteln.

Tabelle 3

*Radien der Adaptationstrials*

Testperson	Session					M
	1	2	3	4	5	
1	10,62	10,32	10,55	9,95	11,34	10,56
2	8,94	8,89	9,34	9,76	9,82	9,35
3	11,8	9,79	10,11	10,35	11,19	10,65
4	10,33	10,68	9,88	11,22	10,84	10,59
5	11,5	27,78	9,95	10,22	10,52	13,99
6	12,09	10,51	10,25	11,38	11,72	11,19
7	9,3	9,55	9,34	9,4	9,39	9,4
8	9,87	9,7	9,94	9,94	10,08	9,9
9	9,74	9,95	9,72	11,77	21,27	12,49
M	10,47	11,91	9,9	10,44	11,8	10,9

*Vermerk: Aufgetragen ist der Mittelwert der Radien der Kreise, die für jeden Adaptationstrial bestimmt worden sind, pro Person und Session. Entsprechend des Adaptationsgains, sollte ein Radius von ca. 9,75m im Mittel gelaufen werden. Bei Testperson 5 in Session 2 sind einige Adaptationstrials gerade gelaufen worden (200m Radius). Der Median lag in dieser Session bei der Testperson aber bei ca. 9,9m.*

Trials mit möglichen Tracking-Fehlern und entsprechend schlechter Anpassbarkeit an einen Kreis wurden ausgeschlossen. Dabei wurden 34 von 4050 Adaptationstrials aus Berechnung der mittleren Radien pro Session pro Person ausgeschlossen. Die Kreisfits dieser Trials hatten ein mittleres quadratischen Residuum, das größer war als der Mittelwert aller mittleren quadratischen Residuen der Kreisfits plus einer Standardabweichung. Die mittleren Radien der Kreisfits auf die Adaptationstrial-Daten sind in *Tabelle 3* abgebildet. Betrachtet man den Gesamtmittelwert von 10,9 m, lässt sich ein entsprechender Curvature-Gain von

$\frac{\pi}{10,9^{-1}} \approx \frac{\pi}{34}$  bestimmen. Dieser liegt also sehr nah an unserem gewünschten Adaptations-Gain.

Es kann festgestellt werden, dass sowohl die Curvature-Gain-Manipulation als solche technisch funktioniert hat, als auch die gewünschten Adaptations-Gains in der Adaptationsphase stabil gelaufen worden sind.

In *Abbildung 5* werden ergänzend typische Adaptationstrials der Session 2 der Testperson 1 und die dazugehörigen Kreisfits dargestellt.

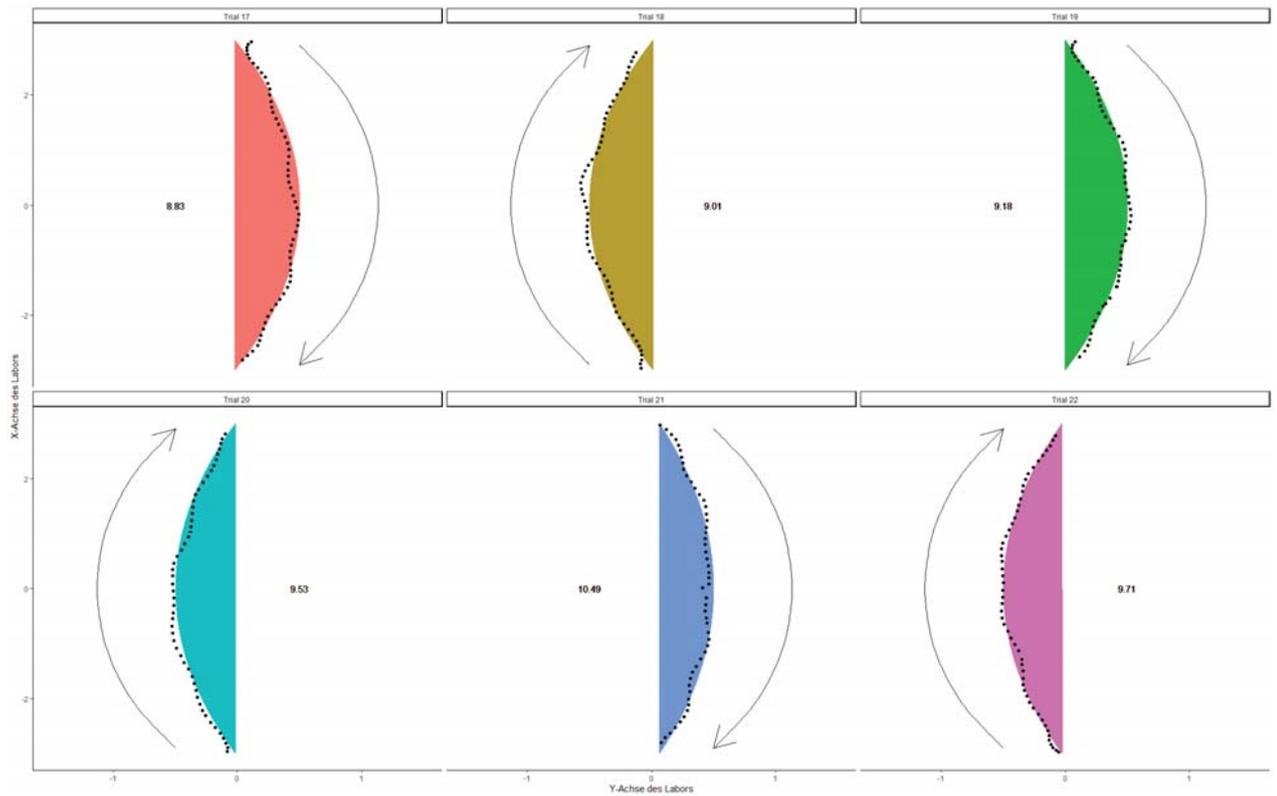


Abbildung 5. Beispiel für Adaptationstrials und Kreisfits. Zu sehen ist die Laufstrecke der Testperson 1 in Session 2 für die Adaptationstrials 17-22. Zu Veranschaulichung der Ergebnisse des Kreisfit-Algorithmus wurden die entsprechenden Kreise der Trials sowie der dazugehörige Radius abgebildet. Die Abbildung verdeutlicht darüber hinaus, dass die Adaptation für beide Laufrichtungen angewandt worden ist und sich die Lage des Kreises entsprechend der Laufrichtung ändert.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Ergebnisse anhand der Hypothesen gegeben. Für jede Hypothese (1-3) werden die jeweiligen Unterpunkte besprochen.

## Hypothese 1

### A. Threshold

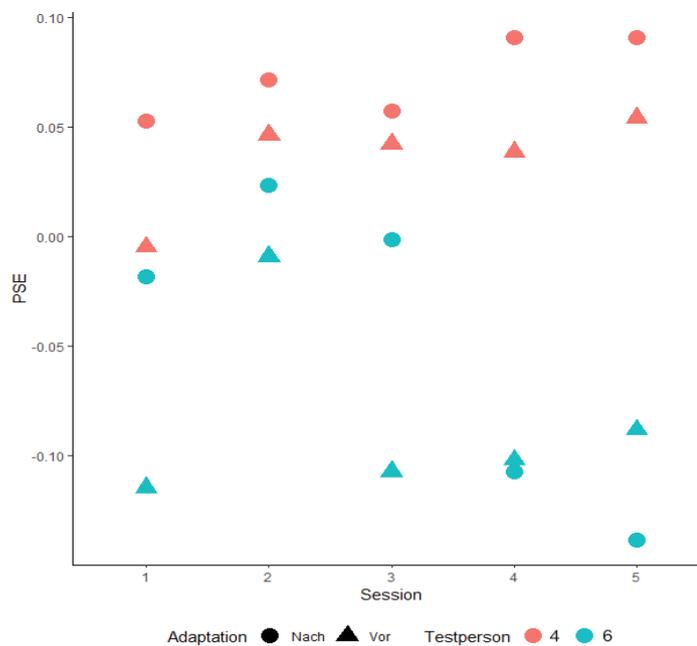


Abbildung 6. Beispiel für den Verlauf der PSE-Werte. Exemplarisch wurden für die Testpersonen 4 und 6 die PSE-Werte vor und nach der Adaptation für jede Session aufgetragen. Wenn die Adaptation den PSE nach rechts verschoben hat, liegt der Nach-Wert oberhalb des Vor-Wertes. Testperson vier zeigt eine konsistente Verschiebung des PSE nach „rechts“, bei der Testperson 6 bleibt dieses Muster nach Session 3 aus.

Für die Schwellwertmessungen wurden logistische psychometrische Kurven pro Testperson an die Antwortdaten gefittet. Dabei musste Testperson 2 ausgeschlossen werden, da das Antwortverhalten auf eine falsch verstandene Aufgabenstellung schließen ließ, und für Testperson 9 konnten in Session 1-4 keine psychometrischen Kurven gefittet werden, die auf eine korrekte Bearbeitung der Aufgabe und ein über zufälliges Antwortverhalten hinaus schließen ließen. Die Rohdaten und alle angepassten Kurven finden sich im Anhang 3. Für die Auswertung wurden die mit `psignifit` berechneten Parameter der einzelnen psychometrischen Kurven getestet. Es wurde dabei ausschließlich der PSE, der sich aus den psychometrischen Kurven ergab, in der Analyse betrachtet. Dieser Wert gibt den Gain an, bei dem eine Testperson mit einer Ratewahrscheinlichkeit von 50% links bzw. rechts für den gelaufenen Gain laut psychometrischer Kurve angeben würde. Für Testperson 4 und 6 wurden diese Werte exemplarisch in Abbildung 6 dargestellt. Für die Testperson 4 sieht man, dass der

Nach-Adaptations-Wert immer über dem Vor-Adaptations-Wert lag, für Testperson 6 galt das in den Sessions 4 und 5 nicht.

Für die Auswertung pro Session wurde die Differenz des PSE-Wertes der Threshold-Messung vor und des Wertes nach der Adaptation gebildet. Für alle Sessions ergab sich eine Normalverteilung der PSE-Differenzen nach Testung mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung. Die Differenzen wurden entsprechend mit einem T-Test für abhängige Stichproben auf Signifikanz geprüft. Die Ergebnisse pro Session sind in *Tabelle 4* aufgeführt. Daraus ergibt sich für die Sessions 1 und 4 eine signifikante PSE-Verschiebung in Richtung des Adaptations-Gains ( $M_{\text{Vor:1}}=-250\text{m}$ ,  $M_{\text{Nach:1}}=25\text{m}$ ,  $M_{\text{Vor:4}}=-100$ ,  $M_{\text{Nach:4}}=45\text{m}$ ). Dies deutet darauf hin, dass ein leicht nach links gerichtetes Ausgangsniveau des PSE, nach der Adaptation stabil nach rechts verschoben worden ist. Session 2 beginnt bereits bei einem hohen, d.h. nach rechts verschobenen, Ausgangsniveau und steigt nach Adaptation wieder an.

Auffällig ist das hohe Ausgangsniveau in der Session 5 ( $M_{\text{Vor:5}}=38$ ) und die hohen Standardabweichungen für alle Werte in den Sessions 3 und 5. Insgesamt lässt sich feststellen, dass deskriptiv in allen Sessions eine PSE-Verschiebung nach rechts erfolgt ist, inferenzstatistisch ist dies aber für die Sessions 2, 3 und 4 nicht festzustellen.

Um diesen Gesamteffekt genauer darzustellen wurden psychometrischen Kurven erstellt, die an die Antwort-Daten über alle eingeschlossenen Testpersonen hinweg angepasst worden sind. D.h. alle Antworten innerhalb der jeweiligen Threshold-Messung wurden so betrachtet, als seien diese von einer Testperson gegeben worden. In *Abbildung 2* finden sich die entsprechenden Kurven pro Session für Vor-Adaptations- und die Nach-Adaptations-Messung. Auch hier finden wir eine konsistente Verschiebung des PSE innerhalb der Session. Die absolute Größe dieser Verschiebung soll hier unberücksichtigt bleiben, da die gemeinsame Verwertung aller Rohantwortdaten der Testpersonen, die Interpretierbarkeit dieser Werte einschränkt.

Tabelle 4

*Mittlere PSE-Werte pro Session Vor- und Nach-Adaptation*

Session	Adaptation (PSE Stimulus)						<i>t</i> (6)	<i>p</i>
	Vor			Nach				
	<i>M</i>	<i>M<sub>Radius</sub></i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>M<sub>Radius</sub></i>	<i>SD</i>		
1	-0,004	-250	0,051	0,040	25	0,039	3,36	0,015
2	0,018	56	0,045	0,049	20	0,024	1,48	0,19
3	0,008	125	0,056	0,029	34	0,08	0,8	0,456
4	-0,01	-100	0,052	0,022	45	0,067	3,01	0,024
5	0,026	38	0,078	0,047	21	0,104	0,72	0,499

*Vermerk:* Aufgetragen sind die mittleren PSE-Werte, die sich aus den psychometrischen Kurven der einzelnen Testpersonen ergeben haben. Dabei wurden die Daten der Testpersonen 2 und 9 ausgeschlossen. Für jeden mittleren PSE-Wert wurde der korrespondierende Kreisradius berechnet ( $PSE^{-1}$ ). Die Werte lassen sich so interpretieren, dass die Testpersonen im Mittel einen Kreis mit dem Radius vor der Adaptation als Gerade wahrgenommen haben und einen Kreis mit dem Radius nach der Adaptation als Geradesus wahrgenommen haben. Die Differenz zwischen den Werten vor und nach der Adaptation wurden mit einem T-Test für abhängige Stichproben auf Signifikanz geprüft.

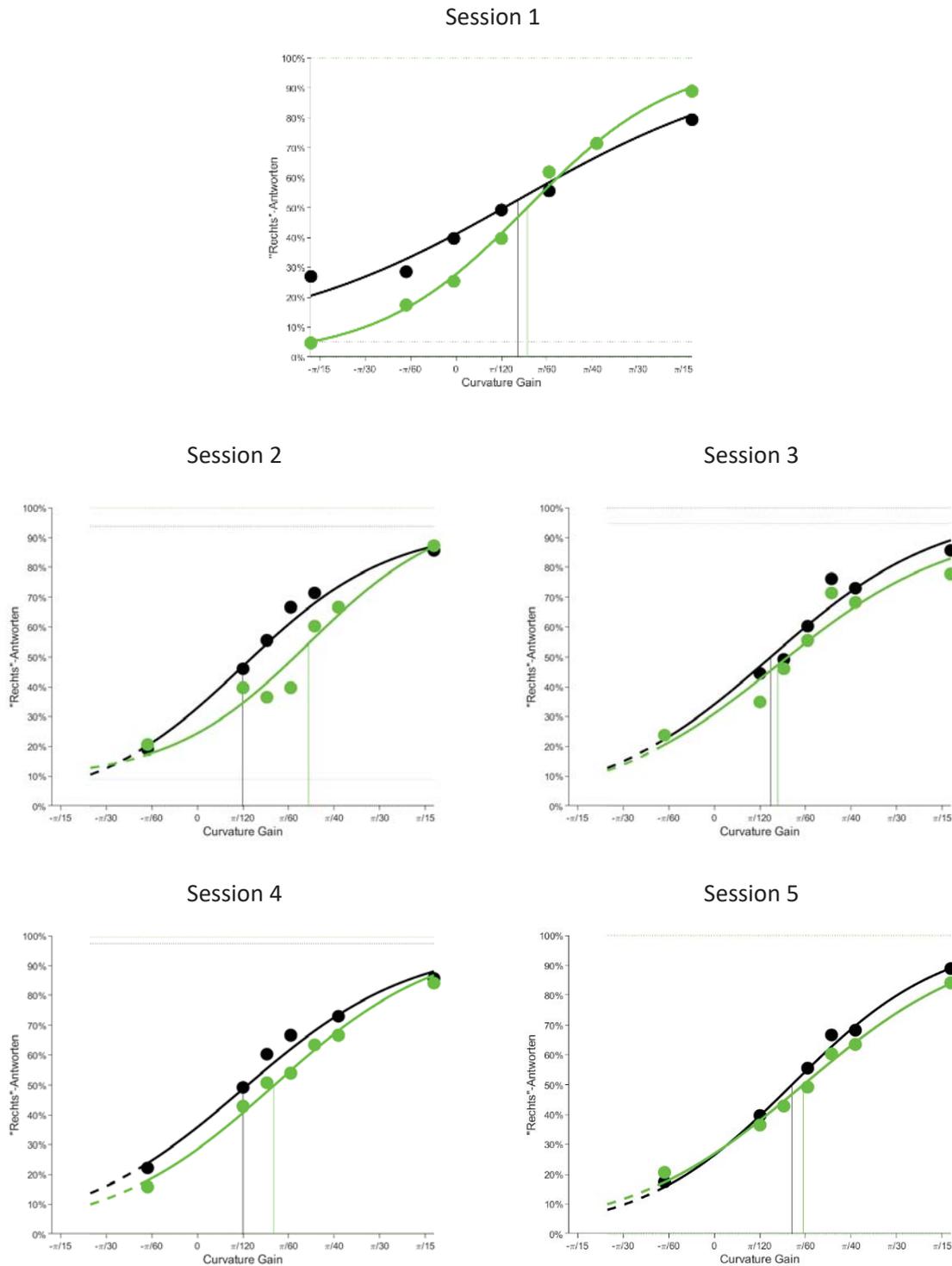


Abbildung 7. Übersicht über PSE-Verschiebung über alle Testpersonen hinweg. Zur Veranschaulichung der PSE-Verschiebung wurden die Antworten aller genutzten Testpersonen auf die Gains in den verschiedenen Threshold-Messungen zusammengefasst, alle Daten wurden so betrachtet, als seien sie durch eine Testperson entstanden. Die schwarzen Werte zeigen die Werte für die Vor-Adaptation-Messung, die grünen Werte zeigen die Ergebnisse für die Messung nach der Adaptation. Die vertikalen Linien zeigen die PSE-Werte, die Punkte sind die gemittelten prozentualen „Rechts“-Antworten. Für die Session 1 wurden dabei andere Gains gemessen als für die Sessions 2-5. Abgebildet sind die in psignifit berechneten psychometrischen Kurven pro Session pro Messung. Wesentlich ist die augenscheinliche Verschiebung der Nach-Adaptations-PSE-Werte nach rechts, relativ zu den Vor-Adaptations-Werten in jeder Session.

## B. Heading

Für die Auswertung der Heading-Daten wurde für jeden Heading-Trial ein Kreis an die Laufstrecke des Probanden gefittet, entsprechend des im Anhang beschriebenen Kreis-Fit-Algorithmus. Der maximale Radius war auf 202 m beschränkt, da der Suchbereich des Algorithmus hier eingeschränkt wurde. Auf rund 6 Meter Laufstrecke in X-Richtung würde ein Kreis mit diesem Radius lediglich  $\frac{\pi}{202 \text{ m}} * 6 \approx 10 \text{ cm}$  Abweichung in Y-Richtung aufweisen. An dieser Stelle wurde aufgrund möglicher Einschränkung der Genauigkeit des optischen Trackings eine geradeaus gelaufene Strecke angenommen. Sollte die Adaptation eine Auswirkung auf die Laufstrecke der Testpersonen haben, wird vermutet, dass sich diese in einer kreisförmigen Veränderung der Lauftrajektorie äußert. Es ergab sich so für jeden Heading-Trial ein Radius R, korrespondierend zur Laufstrecke der Testperson. In Abbildung 8 a) sind exemplarisch jeweils der erste Trial jeder Session der Testperson 3 abgebildet. In Abbildung 8 b) sind die korrespondierenden Kreisfits abgebildet, um einen Eindruck für die Lage und Größe der Kreise zu erhalten. In Anhang 4 sind die Daten aus Teil a) auch für die übrigen Testpersonen gezeigt. Die Abweichung der Testpersonen in Y-Richtung lässt dabei nicht zwangsläufig einen Rückschluss auf die Größe des Radius des korrespondierenden Kreises zu.

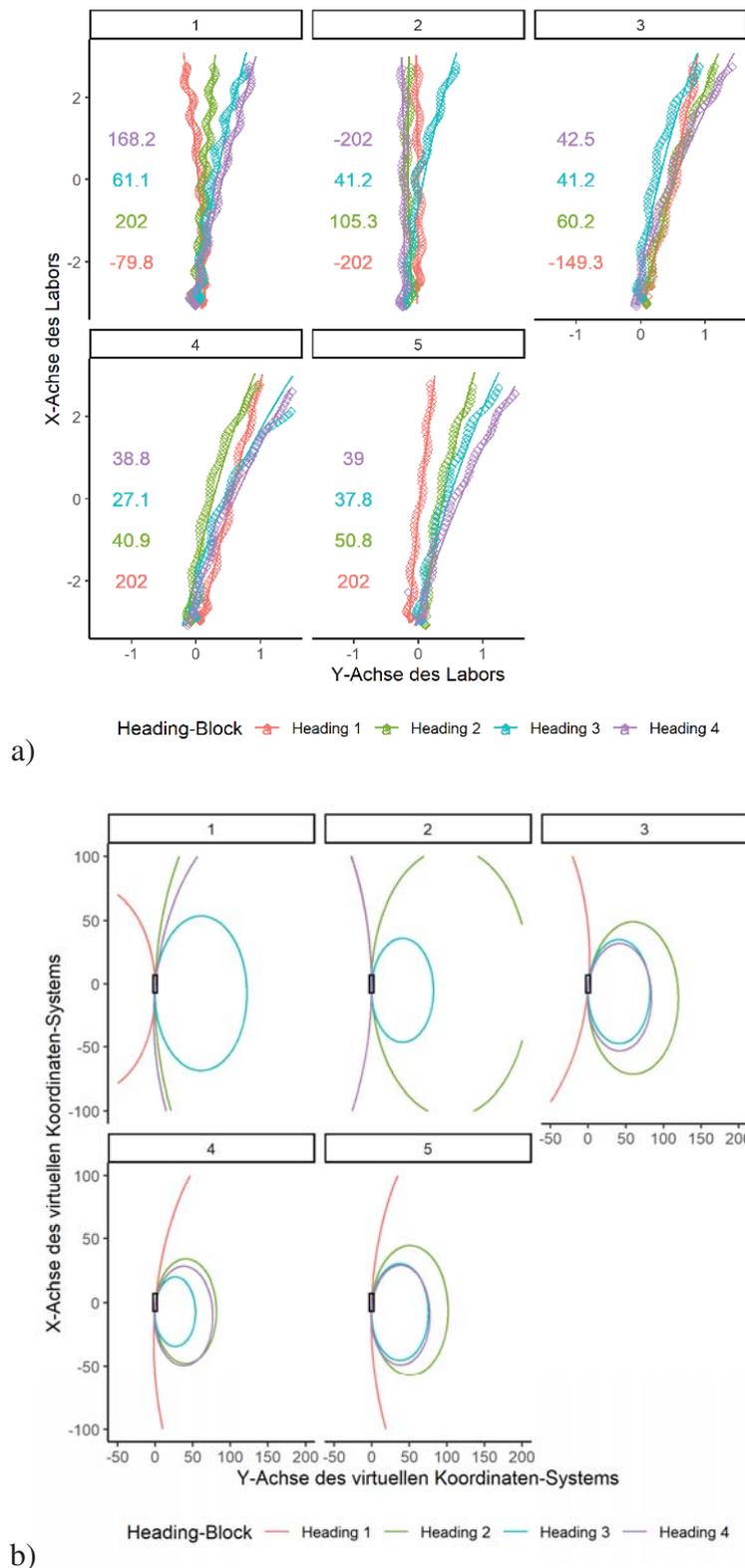
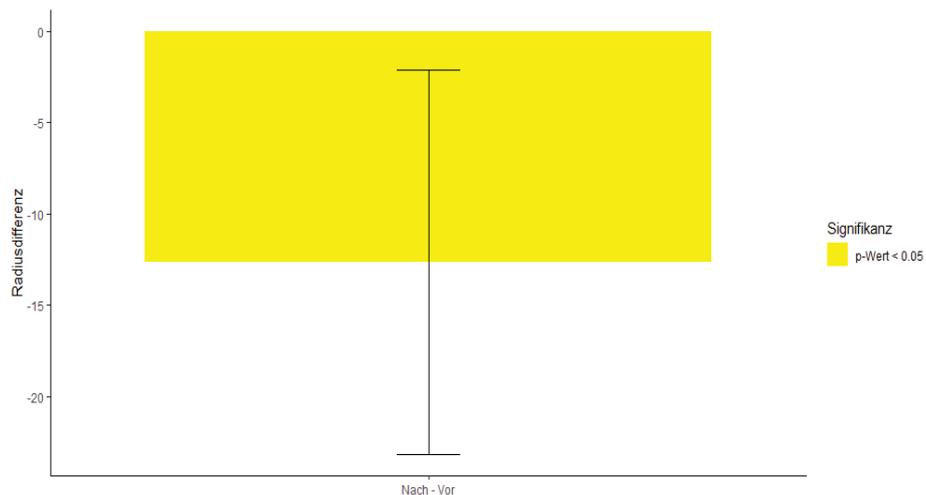


Abbildung 8. Heading-Trials und Kreisfits. a) Abgebildet ist jeweils der erste Trial jedes Heading-Blocks pro Session der Testperson 3. Zusätzlich sind die Kreisradien der gefitteten Kreise angegeben. Kleine Radien zeigen dabei eine starke Krümmung der Laufstrecke der Testpersonen an. Negative Vorzeichen zeigen an, dass es sich um eine Krümmung nach links handelte. Kreisradien von 202 m waren das Maximum des Kreisfit-Algorithmus, hier konnte von einer weitgehend geraden Laufstrecke ausgegangen werden. Sollte die Adaptation die Krümmung der Laufstrecke im Heading beeinflussen, erwartet wir eine systematische Verringerung des Radius bzw. eine Umkehrung des Vorzeichens im Vergleich der Headings 1 / 2 mit den Headings 3 / 4. b) Zur Veranschaulichung der Kreisfits, wurden die gefitteten Kreise aus a) in einem vergrößerten virtuellen Koordinatensystem geplottet. Die Größe des Labors wurde mit einem kleinen grauen Rechteck im Plot dargestellt.

Anders als in Hypothese 1a beschrieben, wurden keine Testpersonen ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass die Manipulation (Curvature-Gain) während der Adaptation alle Testpersonen motorisch ähnlich beeinflusst haben muss, auch wenn die explizite Threshold-Messung nicht funktioniert hat. Die Radii wurden pro Heading-Trial, d.h. pro Laufstrecke, mit einem gemischten linearen Model ausgewertet. Ein Modellvergleich ergab für das Modell mit den Faktoren Adaptation (Vor / Nach) und Session (1 / 2 / 3 / 4 / 5), sowie deren Interaktion, die beste Varianzaufklärung, sowie das beste AIC und BIC. Zu beachten ist, dass aufgrund der Skalierung der Radien ( $-\infty$  bis 0 und 0 bis  $\infty$ ) für die Modellierung zunächst das Inverse der Radien gebildet worden ist. Dies entspricht der Logik der PSE-Werte in Hypothese 1a. Zur besseren Interpretierbarkeit wurden alle berichteten Werte wieder in Radien umgerechnet. In Anhang 2 sind die entsprechenden Mittelwerte dieser gebildeten Radii für jede Testperson aufgeführt. Der Modellvergleich wurde *bottom-up* durchgeführt und es wurden, entsprechend der Hypothese, maximal die im Experimentdesign vorgesehen Faktoren berücksichtigt. Der genaue Modellvergleich ist im Anhang 1 abgebildet. Die Post-Hoc-Testung erfolgte mit dem R-Paket {lsmean} (Russel, 2016) und dem Post-Hoc-Test Tukey-HSD (Abdi & Williams, 2010). In Tabelle 5 ist das finale Modell dargestellt. Die Haupt-Ergebnisse für das gewählte Modell sind in den Abbildung 9 gezeigt.

a)



b)

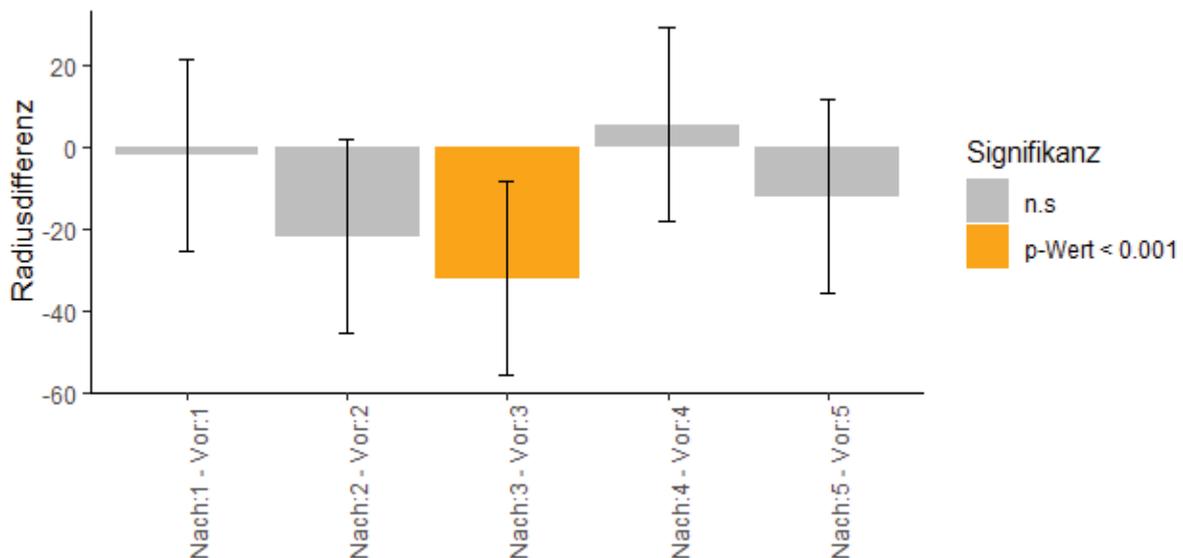


Abbildung 9. Hauptergebnisse des gemischten linearen Modells der Radii. a) Abgebildet ist die Differenz der Radii der Heading-Trials vor Adaptation und der nach der Adaptation, die im linearen Modell auf Signifikanz geprüft worden sind. Zur besseren Interpretierbarkeit wurden die invertierten Radii die im gemischten linearen Modell getestet worden sind, wieder in Radii umgerechnet. b) Diese Ergebnisse wurden in der Post-Hoc-Testung nun pro Session geprüft. Nur für Session 3 ergab sich hier eine signifikante Verringerung des Radii der Heading-Trial zwischen Vor und Nach der Adaptation.

Es konnte für die den Faktor „Adaptation“ ein signifikanter Einfluss in diesem Modell gefunden werden. Das bedeutet, die Radien der Laufstrecken waren nach der Adaptation signifikant kleiner als jeweils vor der Adaptation. Die Personen liefen entsprechend des Konstanten Faktors des Modells tendenziell auf einer nach rechts gebogener Wegstrecke (Radius=114m). Nur für die Session 3 ergab sich in den Post-Hoc-Tests eine signifikante Radiusreduzierung nach der Adaptation. Für die Sessions 1, 2 und 5 war diese Differenz negativ

aber nicht signifikant unterschiedlich von 0. Nur für Session 4 war die Differenz der Radien positiv, aber nicht unterschiedlich von 0.

Tabelle 5

*Finales gemischtes lineares Modell für die Radien der Heading-Trials*

	Radius
Adaptation (Vor)	12.627** (5.414)
Session 2	-9.890 (8.556)
Session 3	0.818 (8.556)
Session 4	-1.132 (8.556)
Session 5	8.038 (8.536)
Konstant	113.516*** (7.095)
Beobachtungen	537

*Vermerk:* Dargestellt sind die wesentlichen Regressionskoeffizienten (in Klammern Standardabweichung) des berechneten gemischten linearen Modells. Wieder wurden an dieser Stelle die invertierten Radien wieder in Radien umgewandelt, um die Interpretierbarkeit zu erhöhen. Bemerkenswert ist hier das vom Modell angenommene Ausgangsniveau eines Heading-Trials mit einem Radius von 113 m. Der Haupteffekt der Adaptation von rund 12,6 m muss hier relativ zu diesem Ausgangsniveau betrachtet werden. Es gilt: \* $p < 0.1$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.01$ .

### C. VSA

In 8% aller 500 Durchgänge konnte kein Zeigewinkel ermittelt werden, der über die Controller und Kopfposition definiert wurde. Für die verbliebenen Durchgänge wurde pro Session pro Testperson der mittlere Zeigewinkel vor und nach der Adaptation bestimmt. Ziel war es einen systematischen Effekt der Adaptation auf die gefundenen Zeigewinkel, die beim Zielen im VSA-Teil des Experiments entstanden sind, zu finden.

Die Daten der mittleren Zeigewinkel waren in allen Sessions außer Session 4 normalverteilt und wurden mit einem T-Test für abhängige Stichproben getestet. In Session 4 wurde zur

Testung der Differenz ein Wilcoxon-Rangsummen-Test für abhängige Stichproben verwendet. Die Ergebnisse finden sind in *Tabelle 6* aufgeführt. Es lässt sich generell feststellen, dass die Standardabweichungen der gemessenen Werte sehr hoch sind. Auch für die Differenzen der Werte lässt sich die Validität der Daten aufgrund der hohen Standardabweichung bestreiten. Wie aus dem Histogramm in der Abbildung 10 hervorgeht, muss man von einer zufälligen Verteilung der Zeigewinkel ausgehen. Es wird im Folgenden von einer weiteren Ergebnisdarstellung zu den Hypothesen IIc und IIIc verzichtet, da die Datenerhebung bereits hier als mit großer Wahrscheinlichkeit fehlgeschlagen angesehen werden muss, bzw. die Ermittlung des Zeigewinkels entsprechend der Auswertungsmethoden nicht zuverlässig funktioniert hat. Hypothesen IIc und IIIc können entsprechend nicht ausgewertet werden. Weitere Ausführungen hierzu sollen Teil der Diskussion sein.

Tabelle 6

*Berechnete Zeigewinkel während der VSA-Aufgabe*

Session	Adaptation (VSA in Grad)						Test	p
	Vor		Nach		Nach-Vor			
	M	SD	M	SD	M	SD		
1	-29,7	30,4	-23,7	37,7	5,9	26,4	0,67	0,52
2	-30,7	42,5	-28,2	26,8	2,5	37,8	0,20	0,85
3	-22,9	47,6	-19,9	23,2	2,9	51,0	0,17	0,87
4	-17,8	50,7	-32,4	19,5	-14,5	51,0	23*	1
5	-10,0	34,7	-7,5	37,3	2,4	34,1	0,21	0,83

*Vermerk:* Aufgetragen sind die mittleren Zeigewinkel, die im VSA-Block ermittelt worden sind. Wichtig ist zu beachten, dass die Ergebnisse darauf hindeuten, dass die Erhebung der Daten technisch fehlgeschlagen ist. \*Hier wurde anstelle eines T-Test ein Wilcoxon-Rangsummen-Test gerechnet, da die Differenzen der VSA-Daten in Session 4 nicht normalverteilt waren.

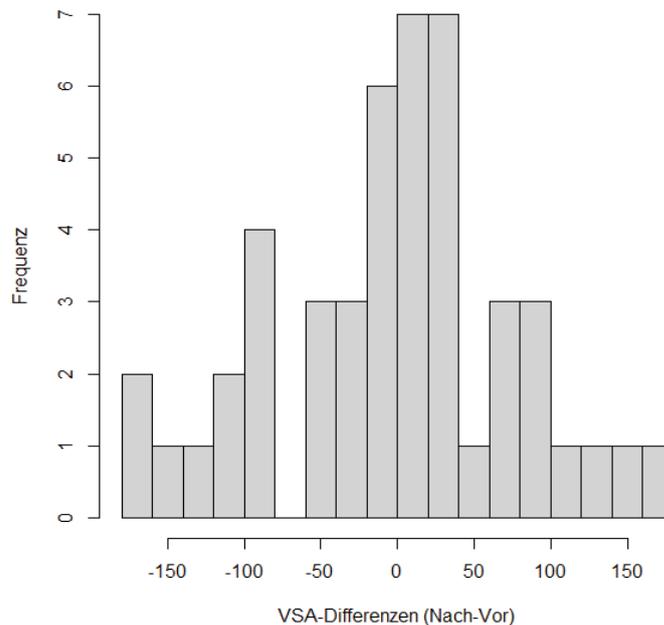


Abbildung 10. Differenzen der gemessenen Zeigewinkel nach und vor Adaptation. Die Abbildung soll den hohen Streubereich der Daten und zufällig wirkende Verteilung der Zeigewinkel-Daten verdeutlichen. In Kombination mit der hohen Ausschlussrate wird davon ausgegangen, dass die VSA-Erhebung technisch fehlgeschlagen ist.

## Hypothese 2

### A. Threshold

Es wurde von einer Session und der darauffolgenden Session die Differenz der Vor-Adaptations-PSE-Werte pro Testperson entsprechend der Werte aus Hypothese 1a gebildet. Da alle Differenzen laut durchgeführten Shapiro-Wilk-Tests normalverteilt waren, wurde für alle Vergleiche ein T-Test für abhängige Stichproben zur Signifikanztestung verwendet. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 7* aufgeführt. Auffällig ist hier, dass deskriptiv das PSE-Niveau von Session 1 zu Session 2 zu Beginn der Messung deutlich erhöht ist. In Session 3 und 2, sowie 3 und 4, nimmt das PSE Niveau in Summe ungefähr wieder in diese Maße ab. D.h. das Ausgangsniveau von Session 1 und 4 ist vergleichbar. Von Session 5 zu 4 beobachten wir deskriptiv wieder einen starken Anstieg des Vor-PSE-Niveaus. Bei einer langsam abnehmenden Auswirkung der Adaptation wäre zu erwarten gewesen, dass sich das Adaptationsniveau der Session wieder um 0 herum befindet. Es wäre zu erwarten gewesen,

dass sich die Differenz von 5 zu 4 also um 0 bewegen sollte. Insgesamt lassen sich die Daten aufgrund der fehlenden Signifikanzen der Tests eingeschränkt interpretieren.

Tabelle 7

*Differenzen der PSE-Werte vor der Adaptation zwischen den Sessions*

Session	Differenz (Vor-Adaptation PSE in Gain)		<i>t</i> (6)	<i>p</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>		
2 -1	0,022	0,067	0,87	0,417
3-2	-0,01	0,05	-0,53	0,613
4-3	-0,017	0,021	-2,17	0,073
5-4	0,036	0,065	1,45	0,198

*Vermerk:* Es wurde die mittlere Differenz der PSE-Daten vor der Adaptation von Session zu Session berechnet. Keine Differenz war signifikant.

## **B. Heading**

Für die Auswertung der Entwicklung der gelaufen Radian vor den Adaptationen pro Session wurde die Differenzen der Vor-Bedingungen von Session zu Session in der Post-Hoc-Testung aus Hypothese 1b geprüft. In Abbildung 11 wird gezeigt, dass sich für diesen Vergleich keine signifikanten Differenzen ergeben haben. Auch lassen sich keine klaren Tendenzen für diesen Vergleich ausmachen.

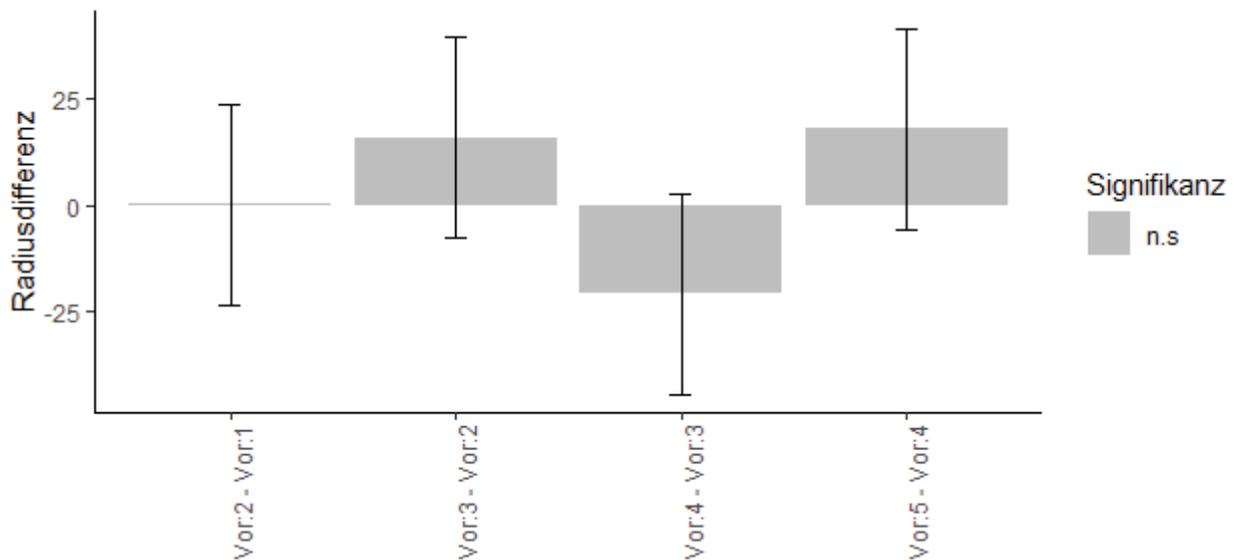


Abbildung 11. Post-Hoc-Vergleiche der Vor-Adaptations-Heading-Trials von Session zu Session. Für die Differenz der Radien der Heading-Trials vor der Adaptation lässt sich im Vergleich der Session keine eindeutige Tendenz erkennen.

### Hypothese 3

#### A. Threshold

Alle Threshold-PSE-Daten nach der Adaptation wurden über die Sessions hinweg verglichen. Für Die Differenzen von Session zu Session konnte eine Normalverteilung angenommen werden. Die Testung erfolgte analog zu Hypothese 2a. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 8* abgebildet. Ähnlich wie in Hypothese 2a beobachtet ist auffällig, dass die Differenz zwischen der Session 5 und 4 sehr hoch ist. D.h. das PSE-Niveau nach der Adaptation war deskriptiv in Session 5 deutlich höher als nach der Adaptation in Session 4. Für den Vergleich von 3 und 2 ergibt sich ein ungefähr entgegengesetzter Effekt. Die Daten können so gedeutet werden, dass die Adaptation in Session 1 und 2 auf ein ähnliches Adaptations-Niveau geführt haben. In Session 3 und 4 wurde ein insgesamt geringeres Adaptationsniveau nach der Adaptation erreicht, d.h. eine möglicherweise durch die Adaptation erreichte Rechtsverschiebung des PSE war weniger stark als in den vorherigen Sessions. In Session 5 war die Adaptation wieder ähnlich effektiv wie in Session 1, wodurch sich die hohe Differenz zur Session 4 erklärt.

Tabelle 8

*Differenzen der PSE-Werte vor der Adaptation zwischen den Sessions*

Session	Differenz (Nach-Adaptation PSE in Gain)		<i>t</i> (6)	<i>p</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>		
2 -1	0,008	0,027	0,82	0,446
3-2	-0,02	0,082	-0,64	0,548
4-3	-0,006	0,083	-0,21	0,844
5-4	0,025	0,074	0,89	0,409

*Vermerk:* Analog zur Tabelle 7 sind hier die Differenzen der Nach-Adaptations-PSE-Werte abgebildet. Deskriptiv beachtenswert ist der Steile Anstieg der Nach-Adaptationswerte von Session 5 zu Session 4. Dieses Ergebnis wird in der Diskussion näher erläutert.

## B. Heading

Für die Auswertung der Entwicklung der gelaufen Radien nach den Adaptationen pro Session wurde die Differenzen der Nach-Bedingungen von Session zu Session in der Post-Hoc-Testung aus Hypothese 1b geprüft. In Abbildung 12 wird gezeigt, dass sich für diesen Vergleich keine signifikanten Differenzen ergeben haben. Tendenziell könnte das gezeigte Muster darauf hindeuten, dass sich das Adaptations-Niveau von Session 2 zu Session 1 noch weiter steigern lassen konnte, d.h. der Radius konnte weiter verkleinert werden. Danach konnte das Adaptationsniveau nicht weiter erhöht werden. In Session 5, die 5 Tage nach Session 4 gemessen worden ist, wurde keine weitere Änderung in der Radius-Differenz festgestellt.

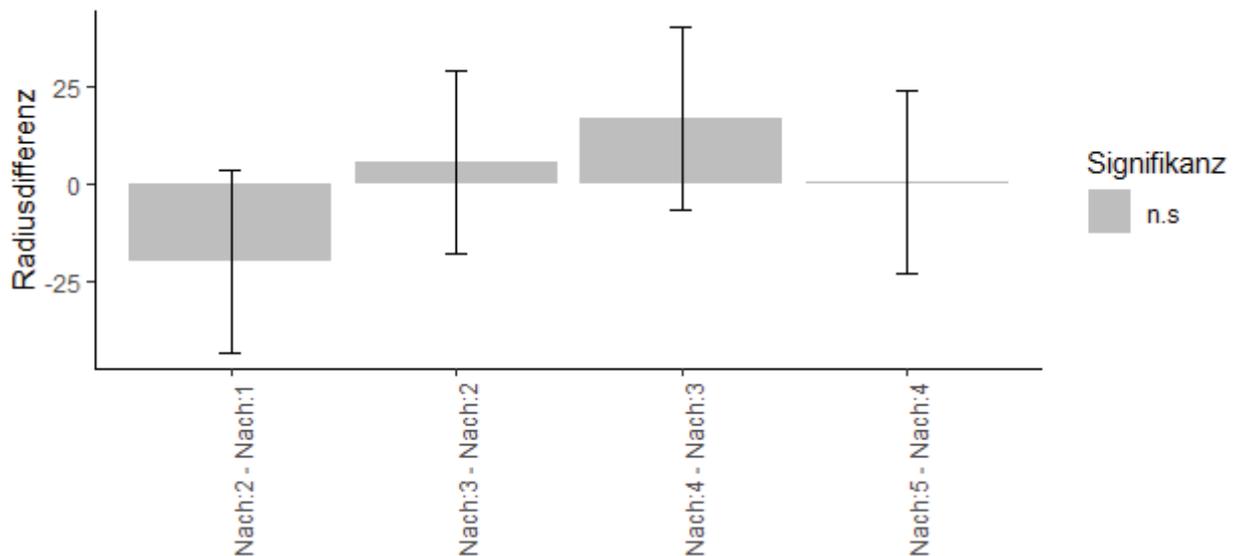


Abbildung 12. Post-Hoc-Vergleiche der Nach-Adaptations-Heading-Trials von Session zu Session. Analog zu Abbildung 11 wurden hier die Nach-Adaptationswerte der Sessions verglichen. Auffällig ist hier die, nicht signifikante, zusätzliche Radiusreduzierung nach der zweiten Adaptation und der deutliche Radiuszuwachs im Vergleich der Werte nach den Adaptationen in Session 3 und 4.

### Heading-Ergänzung

Abbildung 13 zeigt die übrigen Vergleiche, die in der Post-Hoc-Testung des Modells aus Hypothese 1b gerechnet worden sind. Ergänzend zu den Ausführungen zu Hypothese 2b und 3b wird hier gezeigt, dass bis zu Session 3 auch alle Radienvergleiche von den Nach-Blöcken mit den Vor-Blöcken der vorherigen Session negativ ausfielen. Ein ähnlich konstantes Muster lässt sich erst wieder für die Vergleiche des Vor-Adaptations-Niveaus der Session 5 mit den anderen Heading-Blöcken finden. Der Radius fällt für die Session 5 zu Beginn höher aus, als in den vorherigen Blöcken. Diese positive Differenz baut sich mit der Zeit ab und ist im Vergleich mit dem Vor-Niveau der Session 3 nicht mehr feststellbar. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Session 3 und 5 im relativen Niveau der PSE-Verschiebung vergleichbar sind. Hier sind auch die signifikanten Differenzen aufschlussreich: Der Vergleich von *Vor:3* mit *Nach:2* scheint eine starke Radiusserhöhung mit sich gebracht zu haben. Dies deckt sich mit dem Vergleich von *Vor:5* mit *Nach:2*. Zusätzlich erhöht sich der Radius auch im Vergleich von *Vor:5* mit *Nach:3* signifikant. Dies könnte insgesamt ein

Hinweis darauf sein, dass sich in Session 3 bzw. Ende von Session 2 ein Maximum, der durch die Manipulation erreichten Krümmung der Heading-Laufstrecke, ergeben hat.

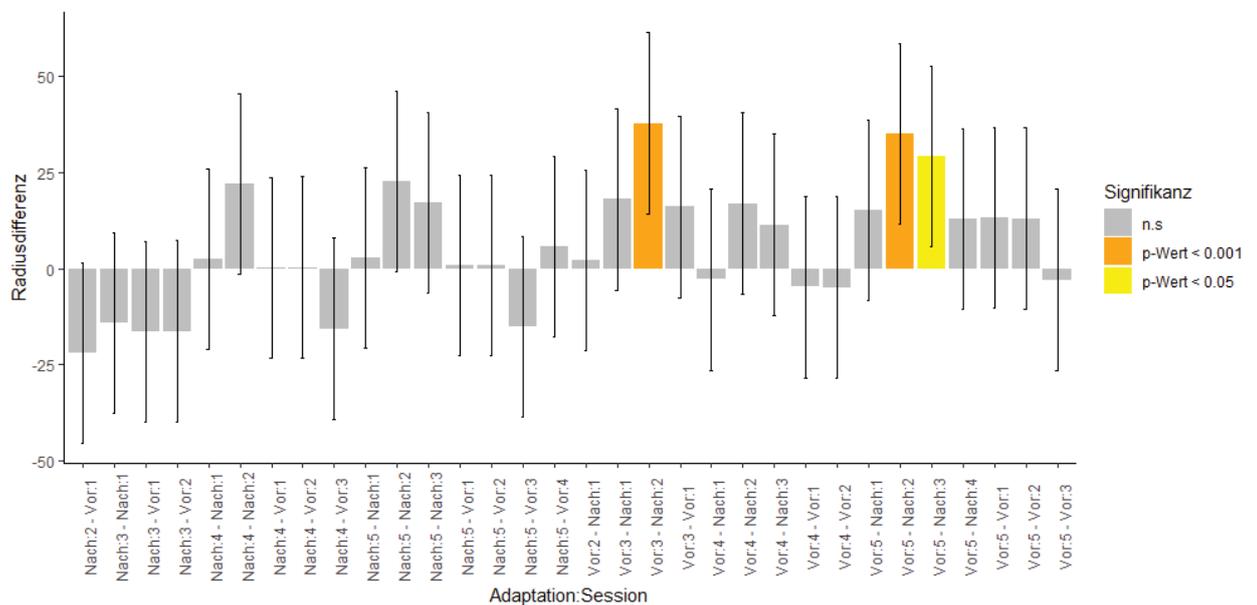


Abbildung 13. Restliche Post-Hoc-Vergleiche aus dem gemischten linearen Modell. Da auch die Interaktion der Faktoren Adaptation und Session im Modell berücksichtigt worden sind, wurden alle mögliche Vergleiche der Heading-Trials vor und nach der Adaptation über alle Sessions hinweg gerechnet. Auf die relevanten Aspekte wird Abschnitt Heading-Ergänzung näher eingegangen.

## Fragebögen

An jedem Tag absolvierten die Teilnehmer den SSQ vor und nach ihrer Sitzung. Die Probanden konnten 16 Symptome der Reisekrankheit in die Kategorien *Keine*, *Leicht*, *Mäßig* und *Schwer* klassifizieren. Ein Gesamtwert wurde entsprechend der gewichteten Mittelwerte berechnet, die in Kennedy et al. (1993) dargestellt wurden. Die mittlere Prä-Post-Differenz wurde über die Testpersonen pro Session gemittelt. In Session 1 war die Differenz mit 12,06 (SD=9,68) am größten und ändert sich unwesentlich über die folgenden Sessions (Session 2: 6,38 (SD=3,99), Session 3: 8,13 (SD=8,70), Session 4: 6,82 (SD=9,61), Session 5: 7,47 (SD=11,78)).

Innerhalb des am Ende einer Session ausgeteilten SUS bewerteten die Testpersonen auf einer Skala von eins bis sieben, wie sehr sie die virtuelle Umgebung als reale Umgebung wahrgenommen haben (Usoh et al., 2000). Der mittlere SUS-Score für dieses Gefühl blieb im

Wesentlichen in allen Sessions unverändert (Session 1: 4,30 (SD=0,83), Session 2:4,72 (SD=0,95), Session 3: 4,57 1,07, Session 4: 4,54 (SD=1,25), Session 5: 4,67 (SD=1,02)).

## Diskussion

### Überblick

Die vorliegende Arbeit sollte ergänzend zu der Arbeit von Bölling und Kollegen (2019) die Auswirkung von wiederkehrenden Adaptationen an einen Curvature-Gain untersuchen. Der Fokus lag dabei auf dem zeitlichen Verlauf möglicher Adaptationseffekte über einen Zeitraum von insgesamt 12 Tagen mit 5 Messzeitpunkten.

Die Idee dieser Erweiterung war es, ein nachvollziehbares Muster für vermutete Effekte der Adaptation über einen längeren Zeitraum zu finden. Das Geradeaus für die Testperson sollte durch die häufige intensive Adaptation an den Adaptations-Gain nach „rechts verschoben“ werden. Im vorherigen Teil dieser Arbeit wurden einige Aspekte der Daten besprochen, die auf ein Adaptationsgeschehen dieser Art hindeuten.

In dieser Arbeit wurde ein mögliches Adaptationsgeschehen an einen Curvature-Gain in einem VR-Setup untersucht. Analysiert wurden drei verschiedene Messvariablen: Wahrnehmungsschwellen für Curvature-Gains (Threshold-Messung), eine mögliche Veränderung beim Laufen ohne visuelle Referenzpunkte (Heading-Messung), sowie Zeigebewegungen auf ein Ziel (VSA-Messung).

### Threshold-Messung

Im Vergleich der Threshold-Werte lässt sich, ähnlich wie in Bölling und Kollegen (2019) gezeigt und in Hypothese 1a angenommen, innerhalb der Sessions eine Adaptation an den Curvature-Gain beobachten: In Session 1 lag eine eindeutige Verschiebung des PSE-Wertes in Richtung des Adaptations-Gains ( $\frac{\pi}{30}$ ) vor. Die beobachtete Rechtsverschiebung der PSE-Werte kann so gedeutet werden, dass die Testpersonen im Schnitt nach den Adaptationstrials einen Kreis als nicht von Geradeaus unterscheidbar beschreiten konnten, der um ca. 20 m reduziert worden ist. Wichtig ist an dieser Stelle zu betonen, dass diese

Ergebnisse nur für unsere gemessenen Vor-Adaptations-PSE-Werte so gedeutet werden kann. D.h. die 20 m-Reduktion des Radius gilt nur für relativ kleine PSE-Werte zu Beginn der Session. Wenn bspw. eine Person bereits bei einem PSE startet, der einem Radius von 30m entspricht, ist eine Reduktion um 20 Meter nicht zu erwarten. Das empfundene Geradeaus wurde also insofern verschoben, dass ein deutlich engerer Kreisbogen als jeweils unmittelbar zuvor, als geradeaus empfunden worden ist. Sowohl für Session 1 als auch Session 4 war diese Rechtsverschiebung der psychometrischen Kurve für die erhobenen Daten signifikant. Für die Sessions 2,3 und 5 ließ sich dieser Effekt im Mittel jedoch nicht zeigen. Hier muss auf die höheren PSE-Werte vor der Adaptation verwiesen werden. Auch die Entscheidung, in den Session 2-5 Gains weiter rechts relativ zu 0 zu messen, könnte die ausgebliebenen signifikanten Effekte in Session 2, 3 und 5 erklären. Für Session 4 ergibt sich aufgrund des unterschiedlichen Messbereiches im Vergleich zur Session 1 ein besonders stabiler Effekt. Außerdem galt nur für die Sessions 1 und 4, dass die Testpersonen im Mittel einen PSE von ungefähr 0 vor Beginn der Adaptationsphase aufwiesen. Zwar waren die Differenzen zwischen Nach und Vor für alle 5 Sessions positiv, d.h. eine Rechtsverschiebung fand statt, ein höheres Ausgangsniveau in den jeweiligen Sessions könnte hier aber in den Sessions 2,3 und 4 eine eindeutige, d.h. auch Inferenzstatistisch-signifikante Messung erschwert haben.

Auch in der Betrachtung der Schwellwerte vor der Adaptation über die Sessions hinweg, zur Auswertung von Hypothese 2a muss festgehalten werden, dass die festgestellten mittleren Unterschiede lediglich deskriptiv ausgewertet werden konnten. So lässt sich vermuten, dass nach Tag 1 ein Teil der Adaptation bestehen bleibt (PSE-Differenz=0,022), in den beiden darauffolgenden Sessions geht dieser Übertrag, dann in Summe ungefähr wieder verloren (PSE-Differenz -0.010 und -0.017) um in Session 4 wieder ungefähr einen Ausgangs-PSE-Wert im Niveau von Session 1 zu ergeben. Der hohe Anstieg in Session 5 (PSE-Differenz im Vergleich zu Session 4: 0.036) lässt sich wie bereits in den Ergebnissen

gezeigt, darauf zurückzuführen, dass die Session 4 zu Beginn fast wieder auf einem 0 Niveau lag. Es kann also unter Berücksichtigung der teststatistischen Uneindeutigkeit der vorliegenden Daten angenommen werden, dass sich Session 5 und 1 im Wesentlichen nicht unterscheiden. Es wird argumentiert, dass das gemessene hohe PSE-Niveau in Session 5 zu Beginn der Session, nicht eindeutig auf die Auswirkungen der Adaptation in den vorherigen Sessions zurückzuführen ist und daher nicht auf einen verbleibenden Adaptationseffekt hindeutet. Anhand der Daten lässt sich also Adaptationsverlauf, wie ihn zum Beispiel Hatada und Kollegen (2005) über 7 Tage aufzeigen, belegen. Hier wäre ein eher stabiler Anstieg des Vor-Niveaus von Session 1 zu Session 4 zu erwarten gewesen und dann eine eindeutige Rückkehr auf das Niveau von Session 1 in Session 5. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen zu Hypothese 3a. Ausgehend von unserem fixen Adaptations-Gain, nähme man über alle Sessions hinweg, eine immer kleinere Differenz zwischen den Nach-Adaptations-PSE-Werten von Session zu Session an, sofern diese Sessions kurz aufeinanderfolgend stattfinden. Das Adaptationsniveau, d.h. die absolute Höhe der Nach-Adaptations-PSE-Werte, hätte aufgrund unseres fixierten Adaptations-Gains einen angenommenen Grenzwert von rund  $\frac{\pi}{30} = 0.608$ . Den höchsten durchschnittlichen PSE finden wir aber am Ende der Session 2 mit 0,049. Eine für Adaptationsprozesse typischen Sättigungsverlauf über die Zeit, wie er beispielweise für Kontraste in visuellen Stimuli auftritt (Greenlee, 1991), gibt, kann also ausgeschlossen werden. Auffallend ist darüber hinaus, dass gerade in Session 3 und 4 die Nach-Adaptationswerte im Vergleich zu den vorherigen Sessions gleichblieben. Das heißt die Einflüsse der Adaptation sind auf Session 1 und 2 beschränkt. Auch in Session 5 (12 Tage nach der ersten Messung) sind die Schwellwerte nach der Adaptation im Vergleich zur Session 4 wieder deutlich angestiegen sind. Dies lässt zusätzlich den Schluss zu, dass 12 Tage nach Messung eventuell einfach keine Nacheffekte mehr durch die vorherigen Sessions auftreten und Effekte eventuell auf Trainingseffekte zurückzuführen sind. Die Alternative,

dass eine zeitlich verzögerte Adaptation stattgefunden hat und der höhere Ausgangs-PSE-Wert zu Beginn der Session 5 auf die die Adaptationen in Session 1-4 zurückzuführen ist, kann aufgrund der hohen Varianz der Daten und der Betrachtung der Einzelperson-Daten nicht gestützt werden.

### **Heading-Messung**

Anders als in unserer vorherigen Studie (Bölling et al., 2019) wurde die Auswertung des Experiments im Heading nicht auf die absolute Abweichung in die Y-Richtung bei der Laufstrecke beim blinden Geradeaus-Laufen in X-Richtung gestützt. Sondern es wurden, angelehnt an die Curvature-Gain Manipulation, Kreise an die gelaufene Strecke der Testpersonen angenähert. In der zugrundeliegenden Studie zeigte sich, dass die Adaptation einen Einfluss auf einen Rechts-Drift in Y-Richtung haben könnte. Unklar blieb, ob das blinde Geradeaus-Laufen während des Headings in der vorherigen Studie auf eine gekrümmte Laufstrecke zurückzuführen ist, oder ob die Personen gerade gelaufen sind, aber zu Beginn der Heading-Trials nach rechts ausgerichtet waren. Eine Abweichung in Y-Richtung könnte dann trotz vollständig gerader Laufstrecke hoch ausfallen, obwohl die Person gerade gelaufen ist. Anstelle der absoluten Abweichungen in Y-Richtung wurden daher Kreise an die Laufstrecke der Testpersonen angenähert. Die Kreisfits verhinderten, dass man Abweichung in Y-Richtung misst, die darauf zurückzuführen sind, dass die Testperson zu Beginn des Heading-Trials nicht vollständig gerade zum Ziel ausgerichtet war. Die Verwendung von angenäherten Kreisen zur Auswertung der Daten lässt so verlässlicher auf eine tatsächliche motorische Adaptation an den Curvature-Gain schließen.

Mit dieser Methode konnte ebenfalls ein Effekt der Adaptation festgestellt werden. Aufgrund der schwierigen Interpretation der Kreisradien sollen lediglich die Richtungen näher bestimmt werden. Dies stützt die Ergebnisse der vorherigen Veröffentlichung (Bölling et al., 2019).

### **VSA-Messung**

Die VSA-Messung muss im Rahmen dieser Arbeit als technisch fehlgeschlagen gewertet werden. Eine stabile Messung des Zeigewinkels bleibt aber eine interessante Messgröße für zukünftige Experimente. Es sollte, ähnlich wie es Hatada und Kollegen (2006) gemacht haben, neben der Zeigebewegung auch eine rein visuelle Einschätzung der Geradeaus-Richtung abgefragt werden (Es wird z. B. ein Punkt am Horizont gezeigt, der sich von links nach rechts bewegt. Es wird gestoppt, wenn die Testperson, diese Richtung als geradeaus empfindet). Zusätzlich sollte für die eigentliche Zeigebewegung eine stabilere Erhebungsmethode genutzt werden. Vorstellbar wäre eine Apparatur (z.B. eine Art mechanischer Arm), die es erlaubt den gewünschten Zeigewinkel (also der Winkel zwischen Kopfausrichtung und Arm) direkt zu messen. Für Aufgabe könnte zusätzlich der Kopf physisch fixiert werden, um eine möglichst genaue und gleichbleibende Messbedingung für die VSA-Aufgabe zu erhalten.

### **Limitationen**

Mit dem komplexen Design des Experiments wurde versucht, ein breites Spektrum möglicher Untersuchungsgegenstände, die bei einem Adaptationsgeschehen an Redirected Walking relevant sein können, abzudecken. Gerade die häufigen VR-Sitzungen der Testpersonen und die Länge jeder einzelnen Sessions bildeten ein Novum für die Messung von Redirected Walking. Die häufigen und wiederkehrenden Messungen der gleichen Person ist eine Stärke dieser Arbeit.

Die Komplexität der einzelnen Sessions, die gewählte Adaptationsprozedur, die Integrität der erhobenen Daten und die nicht näher untersuchten Unterschiede im Umgang und der Anwendung von VR für einzelne Testpersonen stellen die größten Grenzen dieser Arbeit dar.

### **Session-Aufbau**

Beim Aufbau der Sessions sollte die Abfolge des Versuchs möglichst konstant gehalten werden, um eine hohe Vergleichbarkeit der Sitzungen zu gewährleisten. Die zweimaligen Messungen der Schwellenwerte vor und nach der Adaptation, sowie die Adaptationsphase in jeder Session ließen einen einfachen Vergleich über die Zeit zu. Da bei dem diesem Experimentalaufbau jede Session identisch aufgebaut war, konnte die Auswertung pro Session und über die Sessions hinweg problemlos ohne Reihenfolgen-Effekte der Blöcke vorgenommen werden. Die Belastung, die durch diesen Aufbau und einer rund 60-minütigen VR-Sitzung auf die Testpersonen wirkt, könnte negativ auf die Qualität der Daten gewirkt haben. Zwar geht aus der Analyse der Fragebögen hervor, dass die Personen nach der ersten Sitzung relativ gut mit der VR-Sitzung im Sinne der Simulator-Sickness zurechtkamen, in Zukunft sollte jedoch zusätzlich ein Maß für die körperliche und psychische Belastung einer solchen Sitzung erhoben werden. Generell kann man sagen, dass sich die Testpersonen wahrscheinlich an die Gegebenheiten der VR gewöhnen. Einen solchen Gewöhnungseffekt häufiger Immersion beschreibt schon Regan (1995). Außerdem könnte die Messung der Schwellenwerte selbst die Adaptation beeinflusst haben. Gerade die häufige Messung der Thresholds und damit die Anwendung verschiedener auch entgegengesetzt verlaufener Gains könnte den Effekt der Adaptation beeinflusst haben.

Auch die Annahme, die auf die Ergebnisse von Bölling und Kollegen (2019) zurückzuführen sind, dass eine Adaptation in Session 1 stattfinden sollte und die dementsprechend gewählte Verschiebung des Messbereiches für die Schwellenwerte in den Sessions 2-5, könnte hier zu ungenauen Ergebnissen geführt haben. Auch die Wahl der zeitlichen Abstände von jeweils einem Tag von Session 1 zu 2 und von Session 2 zu 3, sowie die zwei Tage zwischen 3 und 4 und die 7 Tage zwischen 4 und 5 lassen sich aufgrund der Datenlage im Nachhinein kritisch reflektieren.

Eventuell konnten die Ergebnisse aus Bölling und Kollegen (2019) für die Sessions 1-3 nicht stabil repliziert werden, weil die Messung der Thresholds zu strickt geplant worden ist. Die Wahl der zeitlichen Abstände erfolgte statisch, ohne tatsächlich auf eine erfolgreiche Adaptation im Sinne einer PSE-Verschiebung zu warten. Unter Annahme einer möglichen Adaptation an Curvature-Gains, könnte ein dynamisches Zeitintervall zwischen den Sessions vielleicht eine genauere Messung von zeitlichen Effekten ermöglichen. Auch die geringe Anzahl der Testpersonen und die Messverschiebung innerhalb des Thresholds zwischen der Session 1 und den übrigen Sessions kann die Ergebnisse hier eingeschränkt haben.

### **Adaptationsprozedur**

Anders als in den in der Einleitung beschriebenen Untersuchungen zu Prismen-Adaptationen und Sakkaden-Adaptationen ist die hier gewählte Form der Adaptationsphase möglicherweise nur bedingt geeignet eine Adaption auszulösen bzw. ist die Effektivität der Prozedur nicht hoch genug. Wie aus der Auswertung der Adaptionstrials hervorgeht, wurden die Testpersonen überwiegend genau an den Adaptations-Gain geführt. Das Fehlerfeedback, dass bei anderen Adaptationen, die z.B. eine konkrete Bewegung zu einem Ziel verlangen, klar definiert ist, ist bei unserem Adaptationstrials nur sehr unterschwellig. Wenn die Testpersonen die Adaptationstrials nicht in der vorgegebenen Krümmung gelaufen sind, wurde Ihnen dies am Ende des Trials in Form einer Punktzahl mitgeteilt, das konkrete Feedback für jeden einzelnen *falschen* Schritt war jedoch nur eine leicht vom virtuellen Geradeaus abweichende Rotation bzw. eine leicht abweichende Bewegung in eine falsche Richtung. Hier könnte man das Feedback auch deutlich drastischer gestalten und kleine Abweichungen vom gewünschten Pfad deutlich stärker mit zusätzlicher Rotation oder Umpositionierung sanktionieren. Bereits kleine Ungenauigkeiten würden so ein starkes Fehlerfeedback während Adaptation nach sich ziehen.

Wenn man die Adaptationsbewegungsdaten betrachtet, zeigt sich, dass die konkrete Bewegung der Testpersonen auf der gewünschten Kreisbahn im Mittel erreicht worden ist. Daher wird an dieser Stelle vermutet, dass die Manipulation, d.h. die Anwendung des Adaptations-Gains, passend zur Verschiebung der Schwellwerte in Session 1, funktioniert hat. Problematischer ist an dieser Stelle die geringe Anzahl an Adaptationstrials innerhalb einer Session im Verhältnis zur Threshold-Messung. Wie bereits im Session-Aufbau diskutiert, könnte die Anwendung von in Summe 126 Threshold-Trials pro Sitzung (2 Messungen mit je 63 Trials und 7 unterschiedlichen Gains) mit den nur 90 durchlaufenden Adaptationstrials interferiert haben. Hier könnte die Adaptationsprozedur in Teilen unzuverlässig bzw. weniger effektiv gewirkt haben.

Auch die Durchführung der Heading-Trials könnte den Testpersonen Feedback darüber erhalten haben, ob sie durch die Adaptation bereits einen gekrümmten Pfad gelaufen sind. D.h. wenn die Testpersonen eine starke Krümmung im Heading gelaufen sind, konnten Sie möglicherweise beim Zurückkehren auf den Ausgangspunkt Feedback über die Stärke dieser Krümmung erhalten haben, da der Weg zum Ausgangspunkt länger war als in einem optimal geradeaus gelaufenen Trial. Da die Heading-Trials noch zwischen der Adaptation und der zweiten Threshold-Messung stattfanden, könnten hier eventuelle Effekte der Adaptation bereits korrigiert worden sein.

### **Datenintegrität**

Gerade für die VSA-Blöcke waren die zwei LEDs die vom PPT gleichzeitig gemessen werden konnten stark limitierend. So war es trotz dynamischer Steuerung der LEDs schwierig die Zeigevektoren während der *Schieß-Aufgabe* genau zu bestimmen. Hier spielten auch Aktualisierungsintervalle des PPT, d.h. die Erkennung der Änderung der LEDs von Kopf auf Controller und wieder zurück, eine große Rolle. Diese Hardware-basierte Umschaltung der Tracking-LEDs sollte daher so nicht mehr für die Messung von Zeigevektoren verwendet

werden. In Zukunft sollte zudem nach Möglichkeit auf eine Kombination zweier unabhängiger Trackingsysteme, hier eines optischen Positionstracking-Systems und dem Orientierungssensor der VR-Brillen, verzichtet werden und auf integrierte Lösungen gesetzt werden. Ein gutes und stabiles Tracking von Personen im Raum und bei natürlichen Laufwegen wurde in den letzten Jahren immer weiterentwickelt. Die Herausforderungen hierbei sind groß und auch neuere Systeme sind nicht vollständig fehlerfrei. Um einen virtuellen Raum auch durch natürliches Laufen erkunden zu können wurden verschiedene Techniken zum Positionstracking in Niehorster und Lappe (2017) auf ihre Genauigkeit untersucht. So ergaben sich auch in neueren Systemen mögliche Einschränkungen, die für den vorliegenden Experiment-Aufbau relevant sein könnten. Häufige Drehungen in Randbereichen des Trackingbereiches, die Tracking-Fehler begünstigen können, und lange Experiment-Zeiten, die zur Beeinträchtigenden Erwärmung der Sensoren führen, könnten Adaptationsszenarien auch neuste VR-Technik vor Herausforderungen stellen.

Über die Trackingqualität hinaus, kann auch die Anzahl der Trials in den jeweiligen Blöcken diskutiert werden. Gerade die geringe Anzahl der Trials pro zu messenden Curvature-Gain in der Threshold-Messung und das binäre Antwortformat der Trials (*Nach rechts oder nach links abgelenkt?*) lassen die Messung für zufällige Effekte anfällig werden. Dies könnte auch die hohen Standardabweichungen für die Daten erklären. In Verbindung mit den lediglich sieben verwendeten Testpersonen kann angenommen werden, dass die Ergebnisse womöglich stabiler ausgefallen wären, wenn die Testung mit weiteren Testpersonen wiederholt wird. Die Tracking-Qualität und die geringe Power der Daten hat aller Wahrscheinlichkeit nach auch die Erhebung der ausgeführte Zeigebewegungen im VSA und die Aussagekraft der Heading-Trials eingeschränkt.

### **Interindividuelle Unterschiede**

Gerade die psychometrischen Kurven der Threshold-Messungen und die unterschiedlichen Ausgangsniveaus der einzelnen Testpersonen in Bezug auf den PSE, lassen erahnen, dass die Adaptation und ihr Verlauf auch anfällig für individuell-unterschiedliche Faktoren sind. Neben altersspezifischen Effekten zur Adaptation, die zum Beispiel in Huitema (2005) besprochen werden und auf eine eingeschränkte Adaptationsfähigkeit mit steigenden Alter hindeuten, sind genauso Erfahrung mit VR und eventuelle Schwierigkeiten mit dem Medium im Rahmen des Experiments nicht näher untersucht worden. Es ist anzunehmen, dass trainierte und erfahrene Testpersonen (und eventuell eine entsprechend insgesamt jüngere Stichprobe), die bspw. zunächst ein Training zu Threshold-Messungen durchlaufen hätten, um einen für sie stabilen Threshold-Wert zu ermitteln, andere Ergebnisse gezeigt hätten. Wie bereits in den Limitationen zum Session-Aufbau beschrieben, wären individuelle Adaptations-Gains, die auf Grundlage der Threshold-Messung gewählt werden, vielleicht zielführender, um eine Adaptation zu bewirken.

Insgesamt konnten die Ergebnisse der vorherigen Veröffentlichung (Bölling et al., 2019) in der vorliegenden Arbeit gestützt werden. Es konnte eine weitgehend stabile Adaptation an Curvature-Gains im Sinne einer Schwellenwert-Verschiebung festgestellt werden. Zusätzlich konnte ein Effekt auf die Laufbewegung der Testpersonen nachgewiesen werden. Der genaue zeitliche Verlauf der Adaptation bleibt zum jetzigen Zeitpunkt noch unklar. Es konnte gezeigt werden, dass Adaptation auch für Curvature-Gains stabil auftritt und Auswertungsmethoden beschrieben, die für zukünftige Experimente genutzt werden können, um diese Effekte zu quantifizieren.

## Ausblick

Diese Arbeit konnte die Frage des zeitlichen Verlaufs von Adaptation an Curvature-Gains nicht abschließend klären. Zur Beantwortung dieser Frage in der Zukunft wird es wichtig sein, einen Adaptationsprozess zu entwickeln, der eine stabile PSE-Verschiebung nach der Adaptation auslöst. Dies könnte beispielsweise über dynamisch angepasste Adaptations-Gains geschehen, d. h. es werden statt einem fixen Adaptationsgains, immer stärker werdende Gains in eine Richtung zu Adaptation genutzt. Auch wäre es vorstellbar, Testpersonen so lange Adaptationstrials laufen zu lassen, bis eine Adaptation messbar ist. Es bleibt Gegenstand der Forschung, welches Vorgehen hier am effektivsten wäre. Auch der tatsächliche Einfluss der Threshold-Messung auf die Adaptation sollte näher untersucht werden. Um Redirected-Walking-Techniken in VR-Anwendungen in Zukunft gezielt einsetzen zu können, und den limitierten physischen Raum besser zu nutzen, sollten vor allem die motorischen Auswirkung, beispielsweise mit dem vorgestellten Kreisanpassungen an die Laufstrecke der Testpersonen untersucht werden vor allem aber sollte ein Ablauf entwickelt werden, der stabil bei einem Großteil der Testpersonen eine messbare Adaptation auslöst. Wenn dies gelungen ist, sollten erneut die zeitlichen Verläufe der Adaptation untersucht werden und dann auch die Auswirkungen dieser Manipulation auf die Bewegung außerhalb der VR betrachtet werden.

Ähnlich wie Untersuchungen von Greifbewegungen mit Prismenbrillen bzw. die Untersuchung Sakkadenadaptation, kann eine stabile und replizierbare Adaptation an einen Curvature-Gain in Zukunft auch als Messmethode genutzt werden. Läsionsstudien, wie zum Beispiel der Vergleich von Adaptationseffekten zwischen Gesunden und Infarktpatienten (bspw. Martin et al., 1996, Vergleich mit Prismenbrillen-Manipulation) ließen sich so auch mit der Adaptation in VR durchführen. Hierdurch könnten Rückschlüsse auf die notwendigen Prozesse und Bedingungen zur Adaptation getroffen werden, die ohne die Entkoppelung von

Bewegung und Bewegungswahrnehmung bisher nicht möglich gewesen sind. Shiraishi und Kollegen (2008) nutzen Prismenadaptation, um die messbare Beeinträchtigung von Patienten mit räumlichem Neglect zu reduzieren. Ein ähnliches Vorgehen in VR könnte auch für solche Patienten mit der Curvature-Gain-Adaptation vorstellbar sein. Zudem bleibt offen, welche Auswirkungen eine bestehende Adaptation auf die Testpersonen hat, wenn sie sich nicht mehr in der VR befinden. Eventuelle negative Nacheffekte müssen auch im Sinne der Sicherheit des Mediums ausgiebig untersucht werden (Wright, 2014).

Diese Arbeit hat gezeigt das Adaptation in Redirected Walking stattfindet. Die häufige und regelmäßige Verwendung von VR in unserem Alltag wird in kommenden Jahren weiter zu nehmen. Es bleibt spannend, welche Langzeiteffekte sich durch dieses Medium und den möglichen Manipulationen unserer Wahrnehmung ergeben. Dieses Projekt zeigt auf, wie komplex es ist, Experimente zu Langzeitadaptation aufzubauen. Es zeigt aber auch, dass dabei neuartige Erkenntnisse gewonnen und neue Methoden entwickelt werden können, um den Einfluss von VR und unsere Wahrnehmung zu untersuchen. Sicher ist, dass VR auch weiterhin eine große Rolle bei der Erforschung der menschlichen Motorik spielen wird.

### Literaturverzeichnis

Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Tukey's honestly significant difference (HSD) test. *Encyclopedia of research design*, 3, 583-585.

Alexander, M. S., Flodin, B. W. G. & Marigold, D. S. (2011). Prism adaptation and generalization during visually guided locomotor tasks. *Journal of neurophysiology*, 106(2), 860–871. <https://doi.org/10.1152/jn.01040.2010>

Bastian, A. J. (2008). Understanding sensorimotor adaptation and learning for rehabilitation. *Current opinion in neurology*, 21(6), 628–633. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e328315a293>

Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. doi: 10.18637/jss.v067.i01.

Bodenheimer, B., Creem-Regehr, S., Stefanucci, J., Shemetova, E. & Thompson, W. B. (2017, März). Prism aftereffects for throwing with a self-avatar in an immersive virtual environment. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)* (S. 141–147). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892241>

Boletsis, C. (2017). The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 24.

Bölling, L., Stein, N., Steinicke, F., & Lappe, M. (2019). Shrinking circles: Adaptation to increased curvature gain in redirected walking. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 25(5), 2032-2039.

Bruggeman, H. & Warren, W. H. (2010). The direction of walking--but not throwing or kicking--is adapted by optic flow. *Psychological science*, 21(7), 1006–1013. <https://doi.org/10.1177/0956797610372635>

Clifford, C. W. G., Webster, M. A., Stanley, G. B., Stocker, A. A., Kohn, A., Sharpee, T. O. & Schwartz, O. (2007). Visual adaptation: neural, psychological and computational aspects. *Vision research*, 47(25), 3125–3131. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.08.023>

Greenlee, M. W., Georgeson, M. A., Magnussen, S., & Harris, J. P. (1991). The time course of adaptation to spatial contrast. *Vision research*, 31(2), 223-236.

Grechkin, T., Thomas, J., Azmandian, M., Bolas, M. & Suma, E. (2016). Revisiting detection thresholds for redirected walking. In E. Jain & S. Joerg (Hg.), *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception - SAP '16* (S. 113–120). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2931002.2931018>

Hatada, Y., Miall, R. C. & Rossetti, Y. (2006). Two waves of a long-lasting aftereffect of prism adaptation measured over 7 days. *Experimental brain research*, 169(3), 417–426. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0159-y>

Hatada, Y., Rossetti, Y. & Miall, R. C. (2006). Long-lasting aftereffect of a single prism adaptation: shifts in vision and proprioception are independent. *Experimental brain research*, 173(3), 415–424. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0381-2>

Hodgson, E., Bachmann, E. & Waller, D. (2008). Redirected walking to explore virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 8(4), 1–22. <https://doi.org/10.1145/2043603.2043604>

Huitema, R. B., Brouwer, W. H., Mulder, T., Dekker, R., Hof, A. L. & Postema, K. (2005). Effect of ageing on the ability to adapt to a visual distortion during walking. *Gait & posture*, 21(4), 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2004.05.007>

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3), 203-220.

Kitazaki, M. (2013). Human Adaptation, Plasticity and Learning for a New Sensory-Motor World in Virtual Reality. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum & R. Shumaker (Hg.), *Lecture Notes in Computer Science. Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments* (Bd. 8021, S. 184–191). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-39405-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39405-8_22)

Kitazawa, S., Kimura, T. & Uka, T. (1997). Prism Adaptation of Reaching Movements: Specificity for the Velocity of Reaching. *The Journal of Neuroscience*, 17(4), 1481–1492. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.17-04-01481.1997>

Kohn, A. (2007). Visual adaptation: physiology, mechanisms, and functional benefits. *Journal of neurophysiology*, 97(5), 3155–3164. <https://doi.org/10.1152/jn.00086.2007>

Kunz, B. R., Creem-Regehr, S. H. & Thompson, W. B. (2013). Does perceptual-motor calibration generalize across two different forms of locomotion? Investigations of walking and wheelchairs. *PloS one*, 8(2), e54446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054446>

Langbehn, E., Lubos, P., Bruder, G. & Steinicke, F. (2017). Bending the Curve: Sensitivity to Bending of Curved Paths and Application in Room-Scale VR. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(4), 1389–1398. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2657220>

Lichtenstein, L., Barabas, J., Woods, R. L., & Peli, E. (2007). A feedback-controlled interface for treadmill locomotion in virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 4(1), 7-es.

Malone, L. A., Bastian, A. J. & Torres-Oviedo, G. (2012). How does the motor system correct for errors in time and space during locomotor adaptation? *Journal of neurophysiology*, *108*(2), 672–683. <https://doi.org/10.1152/jn.00391.2011>

Martin, T. A., Keating, J. G., Goodkin, H. P., Bastian, A. J., & Thach, W. T. (1996). Throwing while looking through prisms: I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation. *Brain*, *119*(4), 1183-1198.

MATLAB. (2019). version 9.7.0.1190202 (r2019b). Natick, Massachusetts: The Math-Works Inc.

Morton, S. M. & Bastian, A. J. (2004). Prism adaptation during walking generalizes to reaching and requires the cerebellum. *Journal of neurophysiology*, *92*(4), 2497–2509. <https://doi.org/10.1152/jn.00129.2004>

Mulavara, A. P., Richards, J. T., Ruttley, T., Marshburn, A., Nomura, Y. & Bloomberg, J. J. (2005). Exposure to a rotating virtual environment during treadmill locomotion causes adaptation in heading direction. *Experimental brain research*, *166*(2), 210–219. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2356-0>

Niehorster, D. C., Li, L., & Lappe, M. (2017). The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research. *i-Perception*, *8*(3), 2041669517708205.

Nilsson, N. C., Peck, T., Bruder, G., Hodgson, E., Serafin, S., Whitton, M., ... & Rosenberg, E. S. (2018). 15 years of research on redirected walking in immersive virtual environments. *IEEE computer graphics and applications*, *38*(2), 44-56.

Péllisson, D., Alahyane, N., Panouillères, M. & Tilikete, C. (2010). Sensorimotor adaptation of saccadic eye movements. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 34(8), 1103–1120. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.12.010>

Pfalz, R. (1983). Efferentes, auditorisches System: Evidenz für seine Mitwirkung bei Adaptation, Habituation, Ermüdung. *Vortrag Arbeitstagung*.

R Core Team. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>

Razzaque, S., Kohn Z., and Whitton M. (2001). Redirected walking. In *Proceedings of the ACM Eurographics Conference*, pp. 289–294.

Razzaque, S., Swapp, D., Slater, M., Whitton, M. C., & Steed, A. (2002, May). Redirected walking in place. In *EGVE* (Vol. 2, pp. 123-130).

Regan, E. C. (1995). Some evidence of adaptation to immersion in virtual reality. *Displays*, 16(3), 135–139. [https://doi.org/10.1016/0141-9382\(96\)81213-3](https://doi.org/10.1016/0141-9382(96)81213-3)

Rietzler, M., Gugenheimer, J., Hirzle, T., Deubzer, M., Langbehn, E. & Rukzio, E. (2018, Oktober). Rethinking Redirected Walking: On the Use of Curvature Gains Beyond Perceptual Limitations and Revisiting Bending Gains. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (S. 115–122). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2018.00041>

Russell V. Lenth (2016). Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69(1), 1-33. doi:10.18637/jss.v069.i01

Saunders, J. A. & Durgin, F. H. (2011). Adaptation to conflicting visual and physical heading directions during walking. *Journal of vision*, 11(3). <https://doi.org/10.1167/11.3.15>

Schütt, H. H., Harmeling, S., Macke, J. H. & Wichmann, F. A. (2016). Painfree and accurate Bayesian estimation of psychometric functions for (potentially) overdispersed data. *Vision research*, 122, 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.02.002>

Shiraishi, H., Yamakawa, Y., Itou, A., Muraki, T. & Asada, T. (2008). Long-term effects of prism adaptation on chronic neglect after stroke. *NeuroRehabilitation*, 23(2), 137–151. <https://doi.org/10.3233/NRE-2008-23203>

Steinicke, F., Bruder, G., Hinrichs, K., Jerald, J., Frenz, H. & Lappe, M. (2009). *Real Walking through Virtual Environments by Redirection Techniques*. <https://doi.org/10.20385/1860-2037/6.2009.2>

Steinicke, F., Bruder, G., Jerald, J., Frenz, H. & Lappe, M. (2008). Analyses of human sensitivity to redirected walking. In S. Feiner, D. Thalmann, P. Guitton, B. Fröhlich, E. Kruijff & M. Hachet (Hg.), *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '08* (S. 149). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1450579.1450611>

Steinicke, F., Bruder, G., Jerald, J., Frenz, H. & Lappe, M. (2010). Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16(1), 17–27. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.62>

Suma, E. A., Bruder, G., Steinicke, F., Krum, D. M., & Bolas, M. (2012, März). A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments. In *2012 IEEE Virtual Reality Workshops (VRW)* (pp. 43-46). IEEE.

Suma, E. A., Clark, S., Krum, D., Finkelstein, S., Bolas, M. & Warte, Z. (2011, März). Leveraging change blindness for redirection in virtual environments. In *2011 IEEE Virtual Reality Conference* (S. 159–166). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2011.5759455>

Suma, E. A., Lipps, Z., Finkelstein, S., Krum, D. M., & Bolas, M. (2012). Impossible spaces: Maximizing natural walking in virtual environments with self-overlapping architecture. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(4), 555-564.

Tseng, Y.-W., Diedrichsen, J., Krakauer, J. W., Shadmehr, R. & Bastian, A. J. (2007). Sensory prediction errors drive cerebellum-dependent adaptation of reaching. *Journal of neurophysiology*, 98(1), 54–62. <https://doi.org/10.1152/jn.00266.2007>

Usoh, M., Catena, E., St, S. & Slater, M. (2000). Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 497–503. <https://doi.org/10.1162/105474600566989>

Welch, G., & Bishop, G. (1995). An introduction to the Kalman filter.

Wright, W. G. (2014). Using virtual reality to augment perception, enhance sensorimotor adaptation, and change our minds. *Frontiers in systems neuroscience*, 8, 56. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00056>

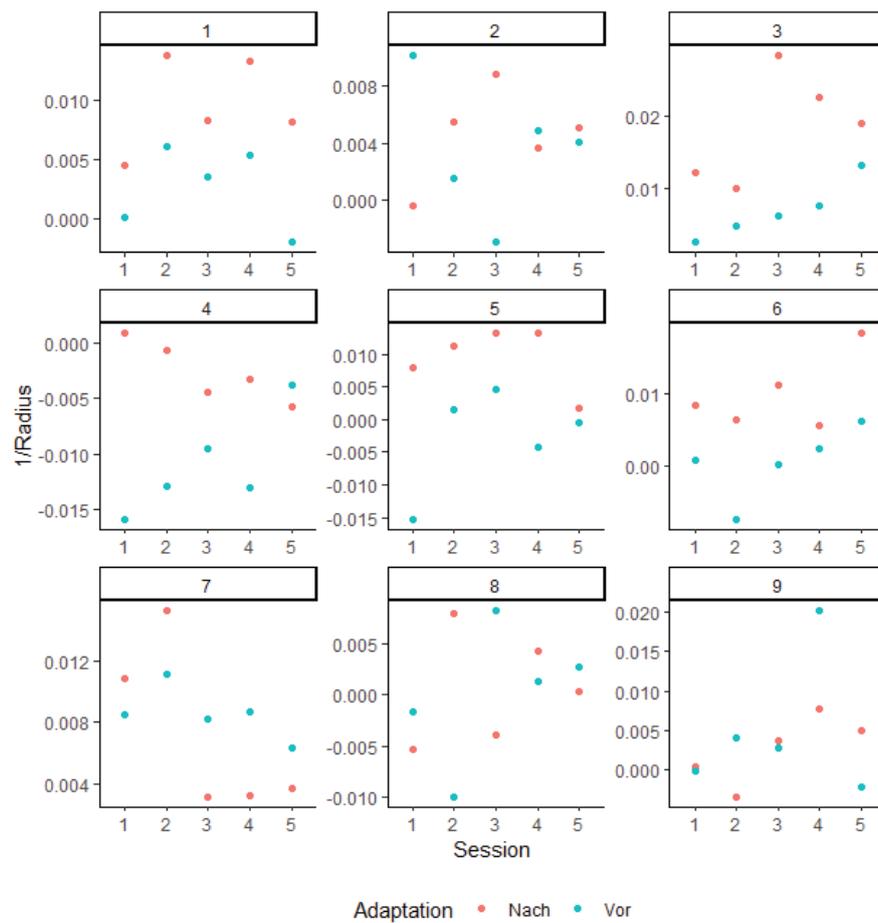
## Anhang

## Anhang 1

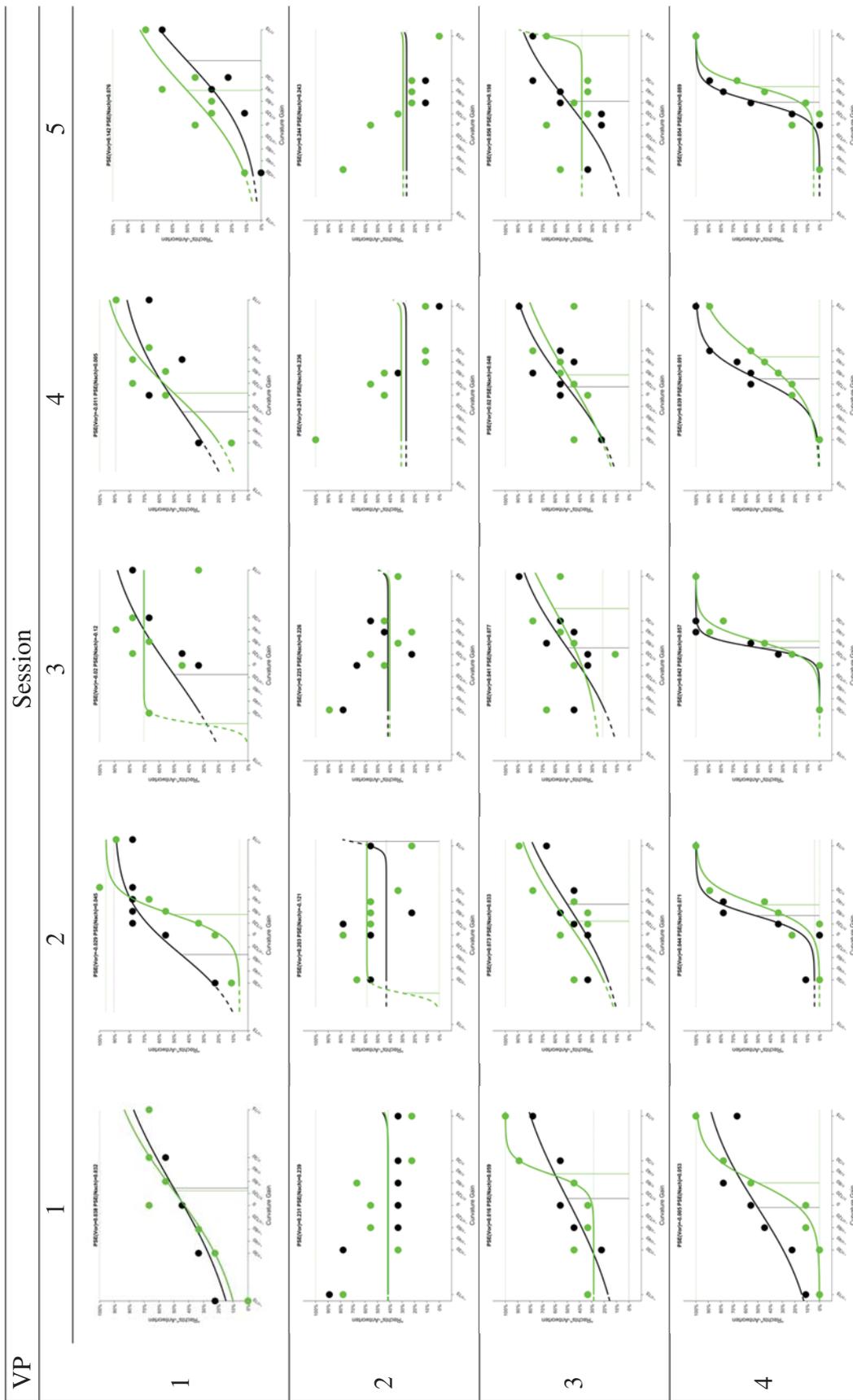
*Entwicklung des gemischten Modells zur Beschreibung der Radius-Daten*

	Parameter	AIC	BIC	logLik	Varianz	Chisq	Df	Pr(> Chisq)
1/Radius ~ (1   Testperson)	3	5,980.234	5,993.092	-2,987.117	5,974.234			
1/Radius ~ Adaptation + (1   Testperson)	4	5,971.573	5,988.717	-2,981.786	5,963.573	10.662	1	0.001
1/Radius ~ Session + (1   Testperson)	7	5,960.381	5,990.383	-2,973.191	5,946.381	17.191	3	0.001
1/Radius ~ Adaptation + Session + (1   Testperson)	8	5,951.745	5,986.033	-2,967.873	5,935.745	10.636	1	0.001
1/Radius ~ Adaptation * Session + (1   Testperson)	12	5,924.692	5,976.124	-2,950.346	5,900.692	35.054	4	0.000

*Vermerk:* Abgebildet sind die verschiedenen getesteten Modelle. Dabei wurde zunächst nur ein zufälliger Effekt durch die Testperson (1 | Testperson) angenommen und dann Nacheinander Modelle mit den Faktoren Session und Adaptation hinzugefügt. Die beiden Faktoren zusammen und ihre Interaktion (Adaptation \* Session) und der zufällige Effekt durch die Testpersonen bildete das beste Modell.

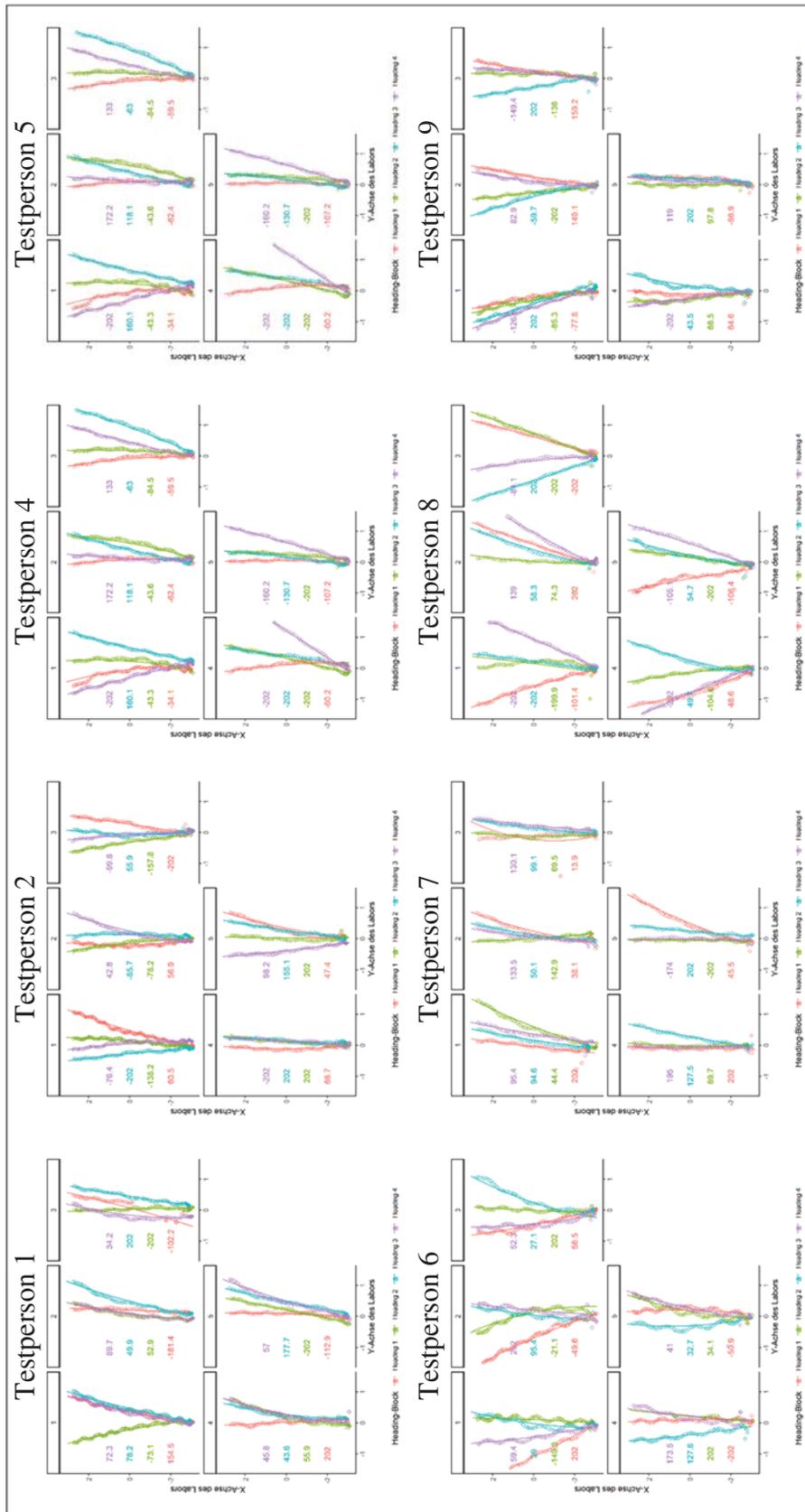


Anhang 2. Gemittelte Radii der Heading-Trials pro Testperson und Session – Vor und nach der Adaptation. Zur Veranschaulichung der Radii-Daten der Heading-Trials auf Einzelpersonenebene, wurden die ermittelten Radii der Heading-Trials vor der Adaptation und die entsprechenden Werte nach der Adaptation jeweils für jede Session und Testperson gemittelt. Da  $1/\text{Radius}$  abgebildet ist eine stärkere Rechts-Krümmung des Kreisfits als höher liegender Punkt repräsentiert.



Anhang 3. Psychometrische Kurven der Threshold-Messungen pro Testperson. Gezeigt werden alle gefitteten psychometrischen Kurven vor (schwarz) und nach (grün) der Adaptation für die verschiedenen Threshold-Messungen. Auffallend ist, dass sich der PSE-Wert fast in jeder Session in fast jeder Testperson stabil nach rechts verschoben ließ. Die Abbildung wird auf der folgenden Seite fortgesetzt.





Anhang 4. Beispiel-Heading-Trials mit Kreisfit. Abgebildet ist jeweils der erste Trial jedes Heading-Blocks pro Testperson und Session. Zusätzlich sind die Kreisradien der gefitteten Kreise angegeben. Kleine Radien zeigen dabei eine starke Krümmung der Laufstrecke der Testpersonen an. Negative Vorzeichen zeigen an, dass es sich um eine Krümmung nach links handelte. Kreisradien von 202 m waren das Maximum des Kreisfit-Algorithmus, hier konnte von einer weitgehend geraden Laufstrecke ausgegangen werden. Sollte die Adaptation die Krümmung der Laufstrecke im Heading beeinflussen, erwartet wir eine systematische Verringerung des Radius bzw. eine Umkehrung des Vorzeichens im Vergleich der Headings 1 / 2 mit den Headings 3 / 4.

### **Danksagung**

Ich möchte mich herzlich bei meiner Frau, meiner Familie und all meinen Freunden bedanken, die mich in dieser Zeit unterstützt haben.

Besonderer Dank geht dabei auch an Prof. Dr. Markus Lappe, Dr. Harald Frenz, Niklas Stein, Simon Eisbach, die MitarbeiterInnen der Arbeitseinheit Lappe und an die Testpersonen der Studie.

**Selbstständigkeitserklärung des Studierenden**

Hiermit versichere ich, Luke Bölling, dass die vorliegende Arbeit „**Geradeaus**“ **neu kalibrieren: Adaptation in "Redirected Walking" über die Zeit**“ selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

\_\_\_\_\_ (Datum, Unterschrift)

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

\_\_\_\_\_ (Datum, Unterschrift)