



Universität  
Bremen

–Fachbereich 3: Mathematik und Informatik–

**Redirected Walking in Virtual Reality mit  
auditivem Schrittgeräusche-Feedback und  
Rotation während des Blinzeln**

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science (B.Sc.)

vorgelegt von

**Benjamin Brennecke**

Matrikelnummer: 400128

Referent : Prof. Dr. Gabriel Zachmann  
Korreferent : Dr. Rene Weller




## SCHRIFTLICHE VERSICHERUNG

---

Hiermit versichere ich, dass ich meine Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

*Bremen, 16. März 2021*



---

Unterschrift

## ZUSAMMENFASSUNG

---

In dieser Arbeit geht es um Redirected Walking, mit dem Personen in VR-Anwendungen davon abgehalten werden können mit den physikalischen Grenzen des realen Raumes zu kollidieren, ohne dabei zu merken, dass sie unbewusst im Kreis geführt werden (vgl. Razzaque, Kohn und Whitton, 2005, S. 1).

Diese Arbeit zeigt dazu ein akustisches Verfahren auf, dass dazu die Perception der Schrittgeräusche nutzt, die ein Mensch selbst erzeugt. Dieses suggeriert durch sich verändernde Schrittgeräusche das Abweichen von einem als Gerade wahrgenommen Pfad, obwohl die Testpersonen in Wirklichkeit nicht von diesem abweichen. Dies korrigieren diese mit einer Ausgleichsbewegung, womit diese Art der Manipulation vom Prinzip her ein Curvature Gain ist (vgl. Steinicke et al., 2010, S.24-25).

In diesem Experiment wurde gezeigt, dass diese Art des Redirected Walkings wahrscheinlich funktioniert und kombinierte es mit einem bekannten visuellen Verfahren, bei dem die Testpersonen gedreht worden sind, in dem Moment in dem sie blinzelten (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 1). Um diese Verfahren gemeinsam und unabhängig voneinander testen zu können, liefen in einem Versuch 20 Proband\*innen innerhalb eines 10x20m großen Messbereiches auf einen virtuelles Zielobjekt zu, dass sich mit ihrer Ausgleichsbewegung mitbewegte (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1-2). Damit konnten die Testpersonen durchschnittlich 1.67m von ihrer als Gerade wahrgenommenen Strecke nach rechts umgelenkt werden, ohne das sie dies in den meisten Fällen bemerkten.

Neben der daraus resultierten Beantwortung der Forschungsfragen stand die Machbarkeitsprüfung dieses Verfahrens im Fokus dieser Arbeit, weshalb sie nichts über die möglichen Potenziale dabei aussagen kann. Damit eröffnet Redirected Walking mittels Schrittgeräuschen einen möglichen Raum für weitere Forschungsarbeiten, die dieses Thema aufgreifen und die Grenzen und Möglichkeiten davon ergründen.

# INHALTSVERZEICHNIS

---

## I THESIS

1	EINLEITUNG	2
1.1	Relevanz von Redirected Walking	2
1.2	Motivation	3
1.3	Ziel dieser Arbeit	3
1.4	Methodik	4
1.5	Aufbau	4
2	FORSCHUNGSSTAND	5
2.1	Gains und Detection Thresholds	5
2.2	Visual Redirected Walking und Eye Blinking	9
2.3	Acoustical Redirection	12
3	AUDIOVISUELLES REDIRECTED WALKING	16
3.1	Schrittgeräusche Feedback	16
3.1.1	Verfahren	17
3.1.2	Step Detector	20
3.2	Eye Blinking	28
3.2.1	Verfahren	28
3.2.2	Pupil Labs	29
3.3	Kombination	33
3.3.1	Verfahren	33
3.3.2	HTC Vive Cosmos	34
4	EXPERIMENT	37
4.1	Vorstudie	37
4.2	Probanden	39
4.3	Aufbau	39
4.3.1	Umgebung	40
4.3.2	Material	41
4.3.3	Szenarien	43
4.3.4	Variablen	44
4.4	Durchführung	45
4.4.1	Fragebögen	46
4.4.2	Vorbereitung	53
4.4.3	Ablauf innerhalb der Durchführung	53
4.4.4	Evaluation	54
4.5	Ergebnisse	54
4.5.1	Vorbefragung	55
4.5.2	Durchläufe	61
4.5.3	Evaluation	73
5	DISKUSSION	77
5.1	Interpretation der Hypothesen	77
5.2	Besonderheiten und Bezug zu bisherigen Arbeiten	79

6	AUSBLICK	82
II	APPENDIX	
A	ANHANG	84
	LITERATUR	85

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abbildung 2.1	Diese Grafik zeigt das Prinzip vier verschiedener Gains: (a) Rotational Gains, (b) Translational Gains, (c) Curvature Gains, (d) Bending Gains (vgl. Nilsson et al., 2018, S.46). . . . .	6
Abbildung 2.2	Dies sind die Ergebnisse der Rotationen um die verschiedenen Achsen: (a) Rotation um die Up-Achse (b) Rotation um die Right-Achse (c) Forward-Achse (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 6). . . . .	11
Abbildung 2.3	Die ermittelten Curvature Gains von Serfain: Die Y-Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit nach der "links" geantwortet wurde und die X-Achse den angewendeten Curvature Gain (vgl. Serafin et al., 2013, S. 162). . . . .	13
Abbildung 2.4	„(a) Zeigt das Szenario ohne Audioquelle (b) Das Szenario mit statischer Audioquelle (c) Das Szenario mit dynamischer Audioquelle (Feigl et al., 2017, S. 1)“. . . . .	15
Abbildung 3.1	Die Funktion $E(x)$ zum Ausblenden der Manipulation, bei der die X-Achse die Distanz in Metern zum Zielpunkt darstellt und die Y-Achse die Stärke der Manipulation. . . . .	18
Abbildung 3.2	Ein Beispielszenario mit dem Startpunkt S und dem Zielpunkt Z. Der dünne Pfad P1 soll den wahrgenommenen geraden Pfad abbilden und P2 den akustischen illustrieren. Wobei die blaue Farbe für das Wassergeräusch und die Grüne für das Grasgeräusch stehen soll. P2 hat in diesem Szenario nach 20 Metern eine niedrigere Distanz zu Z, als das Haus. Die Proportionen sind hierbei nicht korrekt gewählt, um die Darstellung zu vereinfachen. . . . .	19
Abbildung 3.3	Unterseite der Sohle an der die Sensoren angebracht sind und die Oberseite. . . . .	21
Abbildung 3.4	Eine der verwendeten Pantoffeln. . . . .	22
Abbildung 3.5	Die Realisierung der Kabelführung. . . . .	23
Abbildung 3.6	Das Gehäuse des Step Detectors. . . . .	23
Abbildung 3.7	Die Schaltung ist links im Bild zu sehen und der Arduino UNO rechts. . . . .	24
Abbildung 3.8	Die Schaltung zwischen dem Arduino und den Drucksensoren . . . . .	25
Abbildung 3.9	Funktionsweise des Step Detectors als Aktivitätsdiagramm . . . . .	27
Abbildung 3.10	Pupil Capture mit den Videostreams beider Augen und dem Conf (Konfidenzwert) und FPS . . . . .	30

Abbildung 3.11	Das HTC Vive Add-On im HMD . . . . .	31
Abbildung 3.12	Eine Ansicht Pupil Captures bei geschlossenen Augen. Das rechte Auge hat hierbei noch keinen Konfidenzwert von 0. . . . .	32
Abbildung 3.13	Die Logik der Blink Detection als Aktivitätsdiagramm. . . . .	32
Abbildung 3.14	Die Vive Cosmos von HTC, die ohne externes Tracking funktioniert. . . . .	35
Abbildung 4.1	Das Setup bei der Kalibrierung (im linken Part) und der Laserpunkt beim Ausrichten der Cosmos (im rechten Part). . . . .	38
Abbildung 4.2	Die Halle als Panoramaaufnahme . . . . .	40
Abbildung 4.3	Die Aufteilung des Messbereiches. . . . .	40
Abbildung 4.4	Eine Probadin mit der verwendeten Hardware. . . . .	41
Abbildung 4.5	Die initiale Perspektive in der virtuellen Umgebung (Weg eingeblendet) . . . . .	43
Abbildung 4.6	Die initiale Perspektive in der virtuellen Umgebung nach Start eines Durchlaufes (Weg ausgeblendet). . . . .	44
Abbildung 4.7	Der Vorabfragebogen ohne Einwilligungserklärung . . . . .	46
Abbildung 4.8	Der Fragebogen der nach jedem Szenario verwendet wurde. . . . .	49
Abbildung 4.9	Der Fragebogen nach dem Experiment. . . . .	51
Abbildung 4.10	Ein Durchlauf illustriert mit zum Teil überlagerten Aufnahmen aus der Perspektive einer der Kameras, mit eingezeichnetem Raster des sichtbaren Messbereiches. . . . .	54
Abbildung 4.11	Die Häufigkeit der Antworten, ob die Proband*innen an Technik interessiert sind. . . . .	55
Abbildung 4.12	Die Häufigkeit der Antworten, ob die Proband*innen Videospiele spielen. . . . .	56
Abbildung 4.13	Die Häufigkeit der Antworten, ob die Proband*innen Erfahrung mit VR haben. . . . .	57
Abbildung 4.14	Die durchschnittliche Dauer pro Szenario. . . . .	62
Abbildung 4.15	Die durchschnittliche Anzahl der gelaufenen Schritte pro Szenario. . . . .	63
Abbildung 4.16	Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des Szenarios ohne Manipulationen. . . . .	64
Abbildung 4.17	Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des Blinking-Szenarios. . . . .	64
Abbildung 4.18	Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des ASRDW-Szenarios. . . . .	65
Abbildung 4.19	Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des Kombinationsszenarios. . . . .	65
Abbildung 4.20	Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des Szenarios ohne Manipulationen. . . . .	66



Abbildung 4.21 Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des Blinking-Szenarios. . . . . 67

Abbildung 4.22 Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des ASRDW-Szenarios. . . . . 67

Abbildung 4.23 Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des Kombinationsszenarios. . . . 67

Abbildung 4.24 Durchschn. Pfad beim Szenario ohne Manipulationen. 70

Abbildung 4.25 Durchschnittlicher Pfad beim Kombinationszenario. . . 70

Abbildung 4.26 Durchschnittlich gelaufener Pfad beim Blinking-Szenario. 71

Abbildung 4.27 Durchschnittlich gelaufener Pfad beim ASRDW-Szenario. 71

Abbildung 4.28 Die durchschnittlichen gemessenen Abweichungen vom Zielpunkt. . . . . 72

Abbildung 4.29 Die durchschnittlichen Ergebnisse der IPQ-Subskalen als Netzdiagramm. . . . . 75

## TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle 4.1	Ergebnisse des Vorabfragebogens . . . . .	58
Tabelle 4.2	Ergebnisse des SSQ-Fragebogens vor dem Experiment.	60
Tabelle 4.3	Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Subskalen sowie des Total Scores vom SSQ-Fragebogen vor dem Experiment. . . . .	60
Tabelle 4.4	Die Abweichungen vom Zielpunkt am Ende der Durchläufe (in cm) . . . . .	69
Tabelle 4.5	Ergebnisse der Zwischenfragebögen nach jedem Szenario. . . . .	73
Tabelle 4.6	Die durchschnittlichen Abweichungen vom Zielpunkt am Ende der Durchläufe der Männer (in cm) . . . . .	74
Tabelle 4.7	Die durchschnittlichen Abweichungen vom Zielpunkt am Ende der Durchläufe der Frauen (in cm) . . . . .	74
Tabelle 4.8	Ergebnisse des IPQ-Fragebogens nach dem Experiment.	74
Tabelle 4.9	Ergebnisse des SSQ-Fragebogens nach dem Experiment.	75
Tabelle 4.10	Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Subskalen sowie des Total Scores vom SSQ-Fragebogen nach dem Experiment. . . . .	76

## ACRONYME

---

VR	Virtual Reality
HMD	Head Mounted Display
HLT	Human Locomotion Triple
ARDW	Acoustical Redirected Walking
VRDW	Visual Redirected Walking
DTS	Detection Thresholds
MWU	Mann-Whitney-U-Test
PSE	Punkt der subjektiven Gleichheit
ASRDW	Acoustic Step Feedback Redirected Walking
2AFC	Two-Alternative Force-ChoiceTask

Teil I

THESIS

## EINLEITUNG

---

Das Tor in neue Welten ist ein Motiv diverser Filme, Serien und Bücher. Von altertümlichen Geschichten bis hin zu aktuellen Science-Fiction-Serien begleitet diese Faszination jeher die Menschheitsgeschichte. Durch den technologischen Fortschritt ist längst eine virtuelle Parallelwelt entstanden, die nicht mehr aus dem menschlichen Alltag wegzudenken ist (vgl. Sindelar, 2018, S. 5-7). Wird diese Parallelwelt mit der Wirklichkeit verglichen, so ist sie abstrakt und zweidimensional. Virtual Reality ist hierzu das Buzzword, das im Digitalisierungstrend als das Pendant zu der sonst eher flachen Softwarelandschaft beworben wird. Ungeahnte Möglichkeiten wie in Videospiele einzutauchen oder sich in Meetings mit virtuellen Avataren zu treffen, klingen nicht mehr nach den kreativen Schranken, die ein flacher Bildschirm dem Menschen auferlegt hat. Die Rede ist von einem unendlichen Simulationsraum, verfügbar gemacht durch Head Mounted Displays (HMDs). Wird dieses Tor jedoch in der Praxis durchschritten, werden schnell die Grenzen des Spielbereiches bemerkbar, die vielmehr an einen bewegbaren Vogelkäfig erinnern, als an die Freiheiten, die Menschen aus dem Alltag gewohnt sind. Ein Abenteuer das schnell an die harten Grenzen der Wirklichkeit stößt, ist wohl weit von der Vision einer frei begehbaren neuen Welt entfernt. Sie ist gefangen und beschränkt von den Sinnen aus der alten. Diese Sinne sind umgekehrt jedoch auch der Schlüssel, um den Käfig in der virtuellen Realität zu verlassen. Eine Antwort darauf, wie dies funktionieren kann, ist Redirected Walking (vgl. Razzaque, Kohn und Whitton, 2005, S. 1). Ein Thema dem sich diese Arbeit widmet.

### 1.1 RELEVANZ VON REDIRECTED WALKING

Redirected Walking ist, wie der Name erahnen lässt, herkömmliches Laufen, nur mit dem Ziel die begrenzte reale Welt in der virtuellen Welt nicht beachten zu müssen. Der\*die Nutzer\*In wird dabei in VR so manipuliert, dass er\*sie nicht gegen reale Hindernisse läuft und im Idealfall diese Manipulation nicht wahrnimmt (vgl. Razzaque, Kohn und Whitton, 2005, S. 1). Um in der virtuellen Welt eine möglichst hohe Immersion zu erreichen, wurde bereits in der Vergangenheit untersucht, welche Fortbewegungsart die natürlichste für den Menschen in VR ist. Hierbei kamen Forscher zu dem Ergebnis, dass dieses einfache Gehen ist (vgl. Usoh et al., 1999, S. 362). Virtuelle Umgebungen können dazu genutzt werden, um Daten besser zu visualisieren und damit auch intuitiver sowie verständlicher zu machen (vgl. Olshannikova et al., 2015, S. 19). Gerade im Kontext aktueller Problematiken, wie zum Beispiel dem Klimawandel, kann diese höhere Immersion auch genutzt werden, um über die komplexen Zusammenhänge solcher Themenfelder besser

aufzuklären (vgl. Kim, 2020, S. 94). Eine verständlichere, räumliche Visualisierung komplexer Zusammenhänge und die verschiedensten Anwendungsfälle für immersive Simulationen sind neben dem unglaublichen Potenzial für die Kommunikations- und Unterhaltungsindustrie, nur ein kurzer Ausblick auf die Chancen frei begehbare, virtueller Umgebungen und die daraus resultierende Relevanz von Redirected Walking.

## 1.2 MOTIVATION

Die Motivation dieser Arbeit begründet sich in der Frage, wie weit akustisches und optisches Redirected Walking kombiniert werden können, sodass idealerweise keine Manipulation als solche von den Probanden\*Innen wahrgenommen wird. Dabei ist eine gesundheitlich verträgliche Simulation angestrebt, die nicht ein maximal wünschenswertes Manipulationsergebnis erzielen soll, sondern eine Basis zu weiterer Forschung geben soll, die ihren Fokus auf die konkrete Anwendbarkeit setzt. Welche Manipulationen dafür am besten genutzt werden und welche Verfahren dazu kombiniert werden können, sind dabei zentrale Fragen, die zu klären sind. Das in dieser Arbeit vorgestellte akustische Verfahren soll parallel dazu getestet werden.

## 1.3 ZIEL DIESER ARBEIT

Das Ziel dieser Arbeit lässt sich aus der Motivation herleiten. Es ist die weitere Erforschung von nicht bewusst wahrgenommenen Redirected Walking. Das Testen eines neuen akustischen Verfahrens. Die Kombination dieses Verfahrens mit einem optischen und das im Rahmen eines Messbereiches von 20m x 10m. Das optische Verfahren soll dabei teilweise repliziert werden.

Dabei ist es nicht das Ziel, dass eine Arbeit in diesem Experiment vollständig repliziert wird. Es soll nicht versucht werden die stärkste akzeptierte Manipulation zu erreichen, sondern eine möglichst akzeptierte und unbemerkte, die gut für die Probanden\*Innen verträglich ist. Da das akustische Verfahren hierbei direkt auf Akzeptanzkriterien geprüft wird und dabei eine hohe Integration in einem komplexeren Anwendungsfall aufweist, ergründet diese Arbeit nicht die Potenziale und Grenzen des vorgestellten Verfahrens. Die ideale Kombination von verschiedenen Verfahren kann im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden, da dazu alle existierenden RDW-Methoden untersucht und kombiniert werden müssten. Die Auswahl des optischen Verfahrens ist daher exemplarisch und intuitiv gewählt.

Diese Teilziele bergen Risiken, wie ein zu weit gefasstes Experiment, falsche Annahmen zu einem neuen Verfahren, negative oder neutralisierende Effekte bei der Kombination beider Verfahren und Probleme mit der Hardware bei einem 20 Meter langen Messbereich. Diese Länge wurde bereits vorher in dem Experiment von Feigl (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1) genutzt, welches diese Arbeit hauptsächlich inspiriert hat.

#### 1.4 METHODIK

Es handelt sich um eine überwiegend empirische Arbeit. Im Rahmen eines Experimentes werden vier Szenarien verwendet, um deren Einfluss auf die Umleitung der Probanden zu messen.

Diese Umleitung bedeutet eine Ablenkung der Probanden\*Innen von einem Weg, der ihnen als Gerade suggeriert wird, wie auch bei Feigl (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1). Dabei werden standardisierte Fragebögen verwendet, um die Qualität der Simulation zu messen und ihre Verträglichkeit. Weitere Fragebögen sind für die Forschungsfragen dieser Arbeit gestaltet worden, um individuelle Aspekte dieses Versuches zu messen. Die erhobenen quantitativen Daten werden statistisch ausgewertet und in der Diskussion interpretiert.

#### 1.5 AUFBAU

Die Arbeit besteht neben dieser Einleitung, die zur groben Übersicht über das Thema dient, aus den folgenden sechs Blöcken: Der derzeitige Forschungsstand, ein Kapitel über Audiovisuelles Redirected Walking, das Experiment, die Diskussion, ein Ausblick und die Zusammenfassung. Das Experiment bildet hierbei den praktischen Teil dieser Arbeit. Zusätzliche Bereiche sind: Das Glossar, eine kurze Danksagung, die eidesstattliche Erklärung, die Anhänge, das Abkürzungsverzeichnis und das Abbildungsverzeichnis.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Vorstellung des Audio-Verfahrens und dem zugehörigen Experiment. Dieses wird auf der Basis des aktuellen Forschungsstandes argumentiert und vermittelt. Die Diskussion dient zur Prüfung der Hypothesen und der Ausblick stellt weitere mögliche Experimente vor, die aufkommende Fragen zu dieser Arbeit beantworten könnten.

Rückblickend begann der erste Schritt hin zu RDW bei der Prüfung, welche Fortbewegungsart am intuitivsten in Virtual Reality ist und dem Nutzer das stärkste Gefühl von Präsenz vermittelt. Hierzu verglich Martin Usoh mit seinen Kollegen das Fliegen, virtuelles Gehen und echtes Gehen miteinander. Das Konzept des echten Gehens, hatte einen so starken positiven Effekt auf die subjektive Präsenz der Testpersonen, in der damals verwendeten Simulation, dass die Ergebnisse klar dafür sprachen, diese Fortbewegungsart weiter zu untersuchen (vgl. Usoh et al., 1999, S. 361-364).

Dies tat Sharif Razzaque mit seinen Kollegen und stellte 2001 den Begriff Redirected Walking vor. Hierzu machte er ein Experiment in dem 11 Probanden\*Innen in einer simulierten Feuerübung, Knöpfe an den Wänden betätigen mussten. Dabei wurde ihre virtuelle Perspektive, konstant und relativ zu ihren Bewegungen rotiert. Das Ziel war es, mittels unbemerkter Manipulation, eine korrigierende physikalische Gegenbewegung der Probanden\*Innen auszulösen. Die virtuellen Knöpfe in der Übung wurden dabei so platziert, dass die Probanden\*Innen diese im Zickzack ablaufen mussten, was die Länge des Durchlaufes künstlich erweiterte. Damit wurden reale, zusätzliche Rotationen der Probanden\*Innen von 90 Grad erreicht (vgl. Razzaque, Kohn und Whitton, 2001, S. 105-108). Dieser Beweis, dass Redirected Walking in der Praxis funktioniert, hat diese Arbeit und weitere Experimente inspiriert, die in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden.

## 2.1 GAINS UND DETECTION THRESHOLDS

Um RDW weiter spezifizieren und diskriminieren zu können, führten Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald und ihren Kollegen das Human Locomotion Triple ein. In diesem Tripel werden drei entscheidende Vektoren für RDW normalisiert dargestellt. Darunter fällt die Gehrichtung  $w$  und der orthogonal dazu verlaufende Right Vector  $s$  sowie der Up Vector  $u$ , der invers zur vorher definierten Gravitationsrichtung beschrieben werden kann. Die Ermittlung dieser Vektoren kann nach Anwendungsfall abweichend und variabel definiert werden. Das *HLT*  $(s, u, w)$  komponiert dabei ein Koordinatensystem solange die Gehrichtung  $w \neq (0, 1, 0)$  ist (vgl. Steinicke et al., 2008, S. 151).



In ihrer Publikation: „Analyses of Human Sensitivity to Redirected Walking“ beschreiben sie dazu drei Gains. Diese dienen zur Unterscheidung und zur Angabe der Intensität der Manipulationen, die beim RDW genutzt werden können, um die Nutzer\*Innen umzuleiten. Der erste ist der Translational Gain  $g^T \in \mathbb{R}^3$ , der auf alle Vektoren des Tripels angewendet werden kann:

$$g^T := \frac{T_{\text{virtual}}}{T_{\text{real}}}$$

Hierbei ist  $T_{\text{virtual}}$  die virtuelle Differenz zwischen dem vorherigen und aktuellen Punkt in der VR-Umgebung und  $T_{\text{real}}$  die virtuelle Kamera direkt auf die reale Trackingposition abgebildet. Wobei die Trackingposition dabei bereits auf das virtuelle Koordinatensystem abgebildet worden ist. Damit lassen sich die Vektoren des  $HLT$  so übersetzen, dass der\*die Nutzer\*In sich virtuell zum Beispiel schneller oder langsamer bewegt als in der Realität. Dadurch lässt sich ein größerer virtueller Bereich auf einen kleineren, realen Raum abbilden (vgl. Steinicke et al., 2008, S. 152).

Die zweite Art von Gain ist der Rotational Gain  $g^R \in \mathbb{R}^3$ , der angibt, wie eine Rotation in VR  $R_{\text{virtual}}$  im Verhältnis zur Rotation in der realen Welt  $R_{\text{real}}$  übersetzt wird:

$$g^R := \frac{R_{\text{virtual}}}{R_{\text{real}}}$$

Dieser Quotient kann als Gewichtung der Rotation auf die Achsen der Vektoren des  $HLT$  angewendet werden, wobei  $s$  um die Nickachse gedreht wird,  $u$  um die Gierachse und  $w$  um die Rollachse. Wendet man dabei den Rotational Gain an, so wäre ein  $g^R = 1$  eine exakt gleiche Übersetzung der realen mit der virtuellen Rotation eines Vektors. Bei  $g^R < 1$  würde mit der Drehrichtung rotiert werden und bei  $g^R > 1$  dagegen. Ein  $g^R > 1$  würde somit die wahrgenommene Rotation verstärken (vgl. Steinicke et al., 2008, S. 152). Sowohl der Translational als auch der Rotational Gain finden in diesem

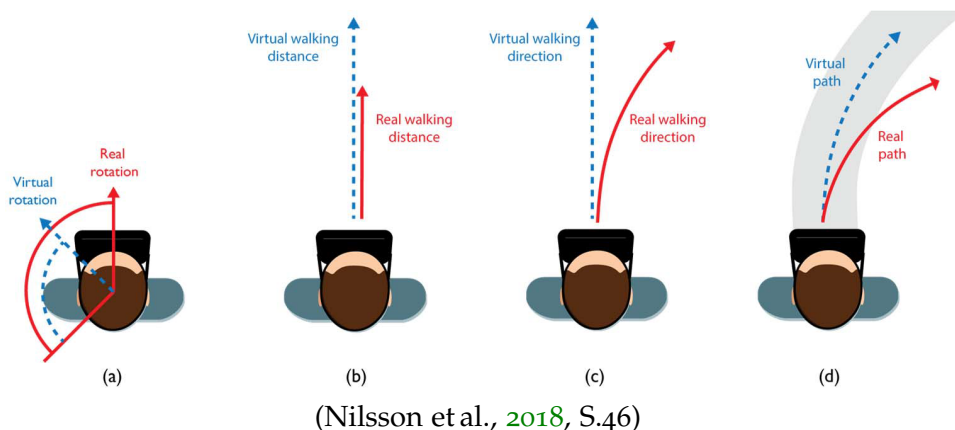


Abbildung 2.1: Diese Grafik zeigt das Prinzip vier verschiedener Gains: (a) Rotational Gains, (b) Translational Gains, (c) Curvature Gains, (d) Bending Gains (vgl. Nilsson et al., 2018, S.46).

Experiment keine Anwendung, um den Fokus auf die kombinierten Verfahren zu beschränken. Ob weitere Gains das vorgestellte akustische Verfahren

ergänzen oder neutralisieren, ist dabei noch zu klären und bedarf weiterer Versuche.

Eine Manipulation, wie eine konstante oder explizit bei Kopfbewegungen durchgeführte Rotation, die nicht wahrgenommen wird, führt zu einer unterbewussten Ausgleichsbewegung in die entgegengesetzte Richtung. Diese lässt sich durch eine zirkuläre Kurve beschreiben mit einem Radius von  $r$  und ist der sogenannte Curvature Gain  $gC$ . In VR kann damit ein gerader Weg suggeriert werden, obwohl die von dem/der Nutzer\*In unbewusst, wahrgenommene Manipulation, diese/n eine Kurve in einem Radius von  $r$  laufen lässt. Dies bedeutet das bei einer Rotation von  $90^\circ$  im Uhrzeigersinn bei  $\frac{\pi}{2}$  Meter der Nutzer einen Viertelkreis läuft mit einem Radius  $r = 1 \Rightarrow gC = 1$ . Wenn dabei kein Curvature Gain angewendet wird, ist  $r = \infty \Rightarrow gC = 0$ . Dieser Gain kann auf jeden Vektor des *HLT* angewendet werden (vgl. Steinicke et al., 2008, S. 152).

In dem Experiment, das in dieser Bachelorarbeit vorgestellt wird, finden nur Curvature Gains Anwendung. Beim Eye Blinking wird der\*die Proband\*In unbewusst gedreht und beim akustischen Verfahren, wird der\*die Proband\*In akustisch langsam vom Weg abkommen, um in beiden Fällen eine natürliche Ausgleichsbewegung herbeizuführen.

Weitere Gains sind die Displacement Gains und die Time Dependent Gains. Die sogenannten Displacement Gains nutzen reale Körper- oder Kopfrotationen des\*der Nutzers\*In, um diese auf virtuelle Translationen abzubilden. Dabei wird zum Beispiel bei Rotationen des Kopfes, bei denen der\*die Nutzer\*In sich nicht von der Stelle bewegt, eine virtuelle Translation durchgeführt. Diese Gains verschieben damit den\*die Nutzer\*In virtuell, statt real und werden als  $(gD[w], gD[s], gD[u]) \in R^3$  definiert, wobei reelle Rotationen des\*der Nutzers\*In von  $\alpha := (\textit{pitchreal}, \textit{yawreal}, \textit{rollreal})$  zu einer virtuellen Positionsverschiebung in die Richtungen der Vektoren  $w, s,$  und  $u$  des *HLT* übersetzt werden können (vgl. Steinicke et al., 2009, S.5).

In den bisher vorgestellten Verfahren wurden reale Bewegungen als entscheidender Funktionsparameter für die Gains verwendet. Die Ausnahme hierbei sind die Time Dependent Gains  $gT$ . Diese können auf die erwähnten Gains angewendet werden und ersetzen Bewegungen mit der Zeit  $T$  als Eingangsparameter. Translation oder Rotation Gains werden damit automatisch in Abhängigkeit zu der Zeit ausgeführt und sind damit unabhängig von den Bewegungen des\*der Nutzers\*In (vgl. Steinicke et al., 2009, S.5).

Um die Gains so anwenden zu können, dass sie als Manipulation unbemerkt bleiben, haben Steinicke und Bruder mit ihren Kollegen, die sogenannten Detection Thresholds oder auch Detektionsschwellen der Translation, Rotation und Curvature Gains ermittelt. In drei Experimenten platzierten sie die Probanden\*Innen in der Innenstand von Münster mit einem zufälligen Startpunkt mit der Voraussetzung, dass sich in der jeweilig generierten Blickrichtung kein Hindernis innerhalb der nächsten 10 Meter befand. Die Zielvorgabe hierbei war es eine unbegrenzte, durchgehende, dreidimensionale Umgebung zu simulieren (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 21). An der Studie nahmen 15 Proband\*Innen teil unter denen auch zwei der Autoren waren.

Bis auf die Autoren war der Ablauf und das Ziel des Experimentes für die Teilnehmer\*Innen unbekannt. Um die Detektionsschwellen messen zu können, wurden konstante Stimuli und die „Two-Alternative Force-Choice Task“-Methode (2AFC) gewählt. Dabei gab es keine Zusammenhänge in der Reihenfolge der untersuchten Gains und diese wurden zufällig gewählt. Bei der 2AFC-Methode gibt es nur zwei Entscheidungsmöglichkeiten, die wählbar sind. Hierbei wurde gefragt, ob die wahrgenommene virtuelle Bewegung größer oder kleiner als die echte, physische ist. Die 50% der Fälle die als kleiner beantwortet worden sind, ergaben dabei den Punkt der subjektiven Gleichheit (PSE) (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 21).

Neben diesem PSE werden die sogenannten Thresholds definiert. Ein Threshold ist ein Punkt, an dem ein Unterschied zwischen der physischen Bewegung und der virtuellen Bewegung gerade noch wahrnehmbar ist. Durch eine psychometrische Kurve lässt sich die Schwelle der Bemerkbarkeit beschreiben. Die Detection Thresholds (DTs) oder Wahrnehmungsschwellen wurden in dem Experiment für die Gains definiert, die kleiner als der PSE waren und bei denen die Antworten der Probanden zu 75% korrekt bei "kleiner" gelegen haben und für die Gains, die über dem PSE lagen und mit 75% "größer" korrekt beantwortet wurden (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 22).

In dem ersten Experiment ging es um die Detektionsschwellen bei Rotational Gains. Dabei wurde der\*die jeweilige Proband\*In zwischen 0,5 bis 1,5-mal langsamer oder schneller gedreht, als seine\*ihre reale physische Rotation betragen hat. Hierbei gab es 10 Durchläufe, die in diesem Bereich in  $0,1^\circ$  Schritten variiert wurden. Die Reihenfolge war hierbei randomisiert und vor jedem Durchlauf wurde der\*die Proband\*In physisch anders orientiert und bekam virtuell Instruktionen sich nach links oder rechts zu drehen. Während eines Durchlaufes musste der\*die Proband\*In sich drehen, bis er\*sie einen roten Punkt vor sich in Augenhöhe sah. Hierbei fand immer eine virtuelle  $90^\circ$  Rotation statt, die bei einem Gain von 0,5 eine  $180^\circ$  physische Rotation erfordert hat und bei einem von 1,5 eine von  $60^\circ$ . Der\*die Proband\*In beendete dabei einen Durchlauf per Knopfdruck selbstständig und konnte dann über die Pfeiltasten des Controllers wählen, ob die Rotation stärker oder schwächer war als die reale physische Rotation (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 22).

Bei den Ergebnissen des Experimentes ergab sich ein PSE von 0,96, wobei dieser zwischen 0,83 bis 1,34 variierte. Die DTs lagen bei 0,67 für die Antwort «größer» und für «kleiner» bei 1,24. Dies bedeutete, dass die Probanden\*Innen bis zu 49% mehr oder 20% weniger rotiert werden konnten, als sie wahrgenommen haben. Es wurde kein Unterschied für die Richtung Links oder Rechts festgestellt, weshalb dabei die Ergebnisse zusammengefasst wurden (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 23).

Bei dem zweiten Experiment ging es um die Translation Gains. Hierbei mussten 15 Probanden\*Innen in jeweils 8 zufallsverteilten Durchläufen 5 Meter in VR, einem grünen Punkt, auf Kopfhöhe, geradeaus folgen. Durch einen  $gT[w]$  von 0,6 bis 1,4 in  $0,1$ -Schritten, variierte die reelle Distanz dabei zwischen 3 bis 7 Metern. Nach jedem Durchlauf mussten sie beantworten, ob

ihre echte gelaufene Distanz kürzer oder länger als die virtuelle war (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 23).

Die Ergebnisse dabei waren, dass die Probanden\*Innen durch die Manipulation 14% weiter oder 26% kürzer gelaufen waren als die wahrgenommene virtuelle Übersetzung. Dabei lag der PSE bei einem  $gT[w] = 1,07$  und der untere DTs lag bei  $gT[w] = 0,78$  und der obere bei einem  $gT[w] = 1,22$ . Diese Resultate lassen darauf schließen, dass die Manipulation durch Translation besser vom Menschen erkannt wird (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 23-24).

In dem dritten Experiment wurden von Steinicke die Curvature Gains  $gC[w] = \{\pm \frac{\pi}{30}, \pm \frac{\pi}{45}, \pm \frac{\pi}{60}, \pm \frac{\pi}{90}, \pm \frac{\pi}{180}\}$  untersucht. Dazu wurde den Probanden\*Innen ein 1 Meter breiter Pfad gezeigt, der insgesamt 7 Meter lang war. In den ersten 2 Metern fand in keinem Durchlauf eine Manipulation statt. Ein grüner Punkt auf Augenhöhe diente dabei wieder der Orientierung und wurde rot, sobald das Ende der Strecke erreicht war. Bei dem vermeintlich geraden Pfad wurde die Szene um die Probanden\*Innen, abhängig von der gelaufenen Geschwindigkeit, gedreht. Diese Gesamtrotation betrug dabei  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  und fand in den letzten 5 Metern statt. Dies entspricht einem Kurvenradius von 57,3m, 28,65m, 19,10m, 14,32m und 9,55m. Nach jedem Durchlauf sollten die Probanden\*Innen entscheiden, ob der Pfad nach links oder rechts abgelenkt war. Die Ergebnisse waren ein PSE von  $\frac{\pi}{1423} = 0,002$ , wobei dieser zwischen  $\frac{\pi}{-162,51} = -0,019$  und  $\frac{\pi}{60,90} = 0,052$  variierte. Die DTs lagen bei einem  $gC[w] = \pm 0,045$ , was einen  $gC[w] = -\frac{\pi}{69,23}$  für nach links verlaufende Kurven und  $+\frac{\pi}{69,23}$  für rechts, bedeutet. Die Probanden\*Innen konnten somit bis zu  $13^\circ$  innerhalb der 5 Meter umgelenkt werden, was sie in einem Radius von 22,03m, im Kreis geführt hätte (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 24-25).

Die bisher vorgestellten Experimente waren visueller Natur und damit reines VRDW. Die Grundlage hierfür bildet folglich die Verarbeitung des Menschen von optischen Reizen. Wie diese zum Teil für RDW ausgenutzt werden können, wird im nächsten Kapitel dargestellt.

## 2.2 VISUAL REDIRECTED WALKING UND EYE BLINKING

Neben der direkten, kontinuierlichen oder von Bewegungen des\*der Nutzer\*In gesteuerten Anwendungen von Gains, gibt es weitere visuelle Verfahren mit denen Manipulationen in eine Simulation eingefügt werden können, sodass diese möglichst natürlich erscheinen. Dazu muss verstanden werden, wie der Mensch visuell manipuliert werden kann. Ein sehr wichtiges Phänomen für VRDW und diese Arbeit, ist die Blindheit des Menschen in Bezug auf Veränderungen zwischen wahrgenommenen Bildern.

Der Grund, warum dieses Phänomen auftritt ist bisher noch ungeklärt und es existieren dazu mehrere Theorien. In der Literatur ist die wohl plausibelste und am meisten vertretene Erklärung, für die sogenannte Change Blindness, dass eine initiale Repräsentation eines Bildes, nach dessen Wahrneh-

mung, vom anschließenden Bild überschrieben wird (vgl. Simons, 2000, S. 8). Welche spezifischen Merkmale oder Faktoren dazu führen, ob wir Veränderungen des Bildes eher wahrnehmen oder nicht, lässt sich hierbei nicht generalisieren und ist auch nicht Thema dieser Arbeit.

Ein wichtiger und bisher identifizierter Hauptfaktor ist hierbei die Aufmerksamkeit, die der Mensch bestimmten Objekten in der Szene des Bildes zu teilwerden lässt (vgl. Rensink, O'Regan und Clark, 1997, S. 373). Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Aufmerksamkeit auch genutzt werden kann, um den\*die Nutzer\*In in VR davon abzuhalten an die Grenzen des Spielbereiches zu gelangen. Dafür kann das Konzept des Distractors verwendet werden. Dies ist ein Objekt in VR, das die Aufmerksamkeit des\*der Nutzers\*In auf sich zieht. Dies kann im Falle, bei dem der\*die Nutzer\*In das Ende des realen Spielbereiches erreicht, erscheinen und lenkt diese\*n zurück ins Zentrum (vgl. Peck, Fuchs und Whitton, 2010, S. 36). Diese beiden Erkenntnisse, dass Menschen bei bestimmten Bedingungen keine Unterschiede im Bildwechsel bemerken können, abhängig von ihrem Fokus, nutzen unter anderem das jetzt vorgestellte und auch die bisher vorgestellten Experimente mit visuellem RDW.

Im Jahre 2018 veröffentlichten Langbehn, Steinicke und deren Kollegen „In the Blink of an Eye – Leveraging Blink-Induced Suppression for Imperceptible Position and Orientation Redirection in Virtual Reality“ (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 1). Dabei ging es um ein Manipulationsverfahren, bei dem der\*die Nutzer\*In in VR genau dann gedreht wurde, wenn er\*sie blinzelt. Da genau dieses Prinzip in dieser Arbeit Anwendung findet, werden die hierfür relevanten Erkenntnisse kurz zusammenfasst.

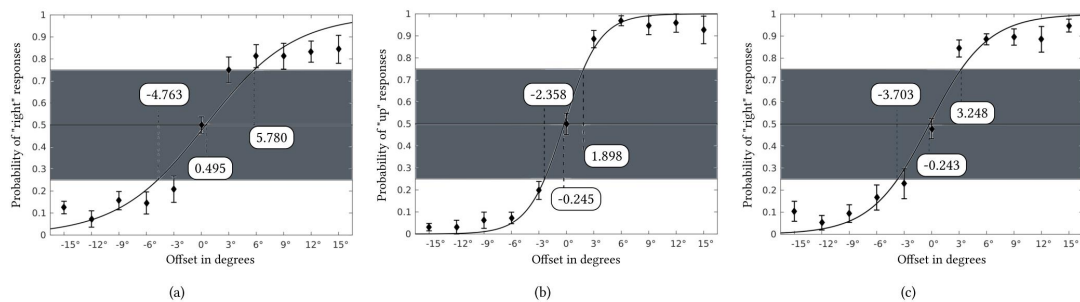
In zwei Experimenten wurden die DTS bei Rotationen und Translationen während des Blinzeln untersucht. Der Fokus dieser Bachelorarbeit liegt jedoch bei den Rotationen, weshalb das erste Experiment genauer vorgestellt wird. Die Probanden\*Innen konnten sich hierbei nicht frei in der virtuellen Umgebung bewegen, sondern standen fix im Zentrum eines virtuellen Raumes. Ihre virtuelle Perspektive wurde vor jedem Durchlauf verändert. Vor Beginn eines Durchlaufes mussten die Probanden\*Innen per Knopfdruck bestätigen, dass sie bereit waren. Taten sie dies, wurde die jeweilige Manipulation, mittels Rotation, um die jeweilige Achse, beim ersten erkannten Blinzeln durchgeführt. Danach wurden die Probanden informiert, dass der Blinzler erkannt wurde. Nach zwei Sekunden wurde die Szene ausgeblendet und sie mussten nach dem 2AFC Prinzip entscheiden, in welche Richtung sie rotiert worden sind. Hierbei standen die Antworten: „Links“ oder „rechts“, „oben“ oder „unten“, je nach Szenario zur Verfügung. Nach der Auswahl mittels Touchpads des Controllers, begann der nächste Durchlauf (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 5).

An dem ersten Experiment nahmen 16 Probanden\*Innen teil, darunter 13 Männer und 3 Frauen. Dabei trug ein\*e Teilnehmer\*In eine Brille und zwei trugen Kontaktlinsen. Von den Probanden\*Innen hatten 13 Erfahrungen mit HMDs und die meisten hatten Erfahrung mit 3D Videospiele. Die Probanden\*Innen waren Studenten\*Innen oder Experten\*Innen aus dem Depart-

ment of Computer Science. Das Alter der Probanden\*Innen lag zwischen 20-35 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 27 Jahren (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 6).

Am Anfang des Experimentes wurde die Pupillendistanz der sogenannte IPD-Wert ermittelt. Zusätzlich mussten die Probanden\*Innen noch einen SSQ ausfüllen und einen Fragebogen über Sehschwächen, stereoskopische Wahrnehmung und bisherige Erfahrung mit VR und Videospiele (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 5).

Das Experiment wurde mit Within-Subject-Design und einem  $3 \times 11$  vollständigen Versuchsplan durchgeführt. Es gab drei systematisch variierte Blöcke und damit einen pro Rotationsachse, in denen 11 verschiedene Offsets  $\in \{0, \pm 3, \pm 6, \pm 9, \pm 12, \pm 15\}$  in Grad (Winkel) untersucht wurden. Die  $15^\circ$  dabei ergaben sich aus einem vorherigen Versuch mit 3 Probanden\*Innen, da dies ein Wert war, der von diesen einfach erkannt werden konnte. Die Durchläufe waren randomisiert und jede Bedingung wurde 6-mal wiederholt, was 198 Durchläufe pro Teilnehmer ergeben hat. Die Probanden\*Innen bekamen pro Block 6 Trainingsdurchläufe und durften jederzeit das Experiment abbrechen oder pausieren (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 6). Die Er-



(Langbehn et al., 2018, S. 6)

Abbildung 2.2: Dies sind die Ergebnisse der Rotationen um die verschiedenen Achsen: (a) Rotation um die Up-Achse (b) Rotation um die Right-Achse (c) Forward-Achse (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 6).

gebnisse der Probanden\*Innen sind in der Abbildung 2.2 zusammengefasst und nach den Blöcken beziehungsweise Rotationswinkeln, die untersucht worden sind, getrennt dargestellt. Die Abbildung zeigt dabei pro Plot, den angewendeten Offset in Grad (Winkel) auf der X-Achse und auf der Y-Achse die Wahrscheinlichkeit für die Antwort, die die Probanden\*Innen getroffen haben. Dabei ist dies abhängig von den untersuchten Fällen entweder die Antwort: „Rechts“ oder „Oben“. Das Ganze ist als sigmodiale, psychometrische Funktion abgebildet, welche den PSE und die DTs bestimmt und zusätzlich für jeden Offset den Durchschnitt und Standardfehler aufzeigt. Beim Block a ist dabei mit  $5,3^\circ$ , die größte Abweichung vom PSE festgestellt worden, was die Autoren damit erklärt haben, dass es sich um eine häufigere und natürliche Bewegung handelt, bei der die Manipulation schwerer bemerkbar ist. Der PSE lag bei diesem Rotationswinkel, um die Up-Achse, bei 0,495 mit einem unteren DTs von -4,763 und einem oberen DTs von 5,780

(vgl. Langbehn et al., 2018, S. 7).

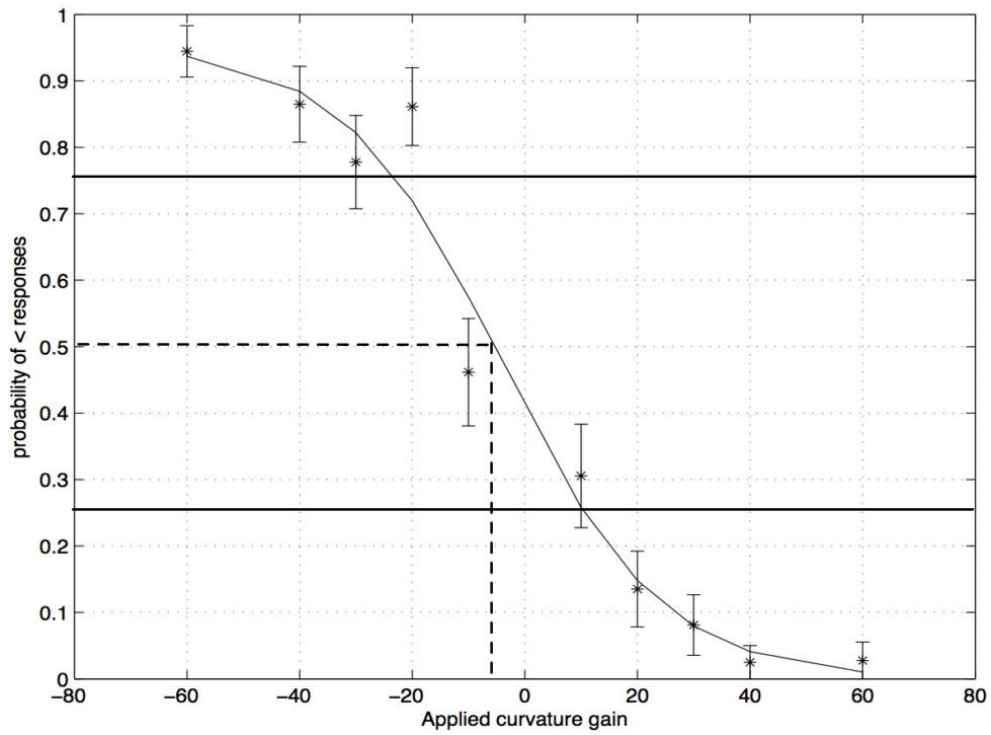
Der ermittelte PSE von 0,495 wurde bei dieser Bachelorarbeit nur um 0,105 erhöht, auf 0,6 Grad, für das später vorgestellte Blinking-Szenario. Da dies trotz der geringen Abweichung zu subjektiver Gleichheit ein positiver Faktor ist, der sich auf die gelaufenen 20 Meter akkumulieren könnte, wurde dies als kleinste, unbemerkbare Größe gewählt. Bei einem ermittelten PSE Wert von kleiner oder annähernd 0, wäre intuitiv eine positive Rotation gewählt worden, die in mindestens 90% der Fälle unbemerkt bleiben sollte. Ob diese Wahl positive Auswirkungen auf das Redirected Walking hat und diese Manipulation in allen Fällen unbemerkt bleibt, muss in dieser Arbeit untersucht werden und bildet damit zum Teil die Grundlage später vorgestellter Hypothesen.

### 2.3 ACOUSTICAL REDIRECTION

In zwei Experimenten in einem abgedunkelten Raum, untersuchte Serafin und ihre Kollegen\*Innen im Jahre 2013 die Rotational und Curvature Gains bei akustischem Redirected Walking. Dazu nutzte sie ein Surround-System mit 16 Lautsprechern, die um den\*die jeweiligen Probanden\*Innen herum zirkulär positioniert wurden mit einem Gesamtdurchmesser von 7,1m. Die 13 Männer und 6 Frauen hörten dabei einen Weckeralarm, der akustisch an verschiedenen Punkten im Raum simuliert wurde. Dabei wurde Vorstellungskraft vorausgesetzt, da sich die Probanden\*Innen den Wecker im Raum vorstellen mussten. Sie mussten sich dann zum Weckergeräusch drehen, wobei 11 verschiedene Rotational Gains in 22 Durchläufen angewendet wurden. Hatte der\*die Proband\*In dann dabei das Gefühl sich in die Richtung des Weckers gedreht zu haben, bestätigte er\*sie dies per Knopfdruck. Die Soundquelle blieb nicht, wie bei einem herkömmlichen Wecker üblich, starr an einem Punkt, sondern bewegte sich mit der Rotation der Probanden\*Innen mit. Bei der Befragung mittels 2AFC nach jedem Durchlauf wurde ein PSE=1 ermittelt. Bei der Antwort, dass die physische Rotation größer war als die virtuelle, lag der DTs bei einem Rotational Gain von 0,82 und bei „kleiner“ bei 1,2. Damit wurde eine Manipulation erreicht, die die Probanden\*Innen um 20% mehr gedreht hat oder um 12% weniger, als diese wahrgenommen haben (vgl. Serafin et al., 2013, S. 161-162).

In dem zweiten Experiment sollten die Proband\*Innen auf das Alarmgeräusch zugehen. Dabei sollte ein gerader Weg suggeriert werden. Damit wurden 10 unterschiedliche Curvature Gains je 2-mal untersucht und nach jedem Durchlauf mussten die Probanden\*Innen angeben, ob der Pfad physisch eher nach links oder rechts gebogen war. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 2.3 zu sehen. Der dabei ermittelte PSE lag bei -5 (vgl. Serafin et al., 2013, S. 161-162).

Die DTs lagen, nach persönlicher, korrigierter Angabe von Serafin, bei -25 für den oberen Curvature Gain und bei 10 bei dem unteren. Wobei der Wert für die Curvature Gains danach angegeben war, um wie viel Grad sich die Umgebung, nach 5 Metern gelaufenem Weg, gedreht hat (vgl. Meyer, Nogal-



(Serafin et al., 2013, S. 162)

Abbildung 2.3: Die ermittelten Curvature Gains von Serfain: Die Y-Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit nach der "links"geantwortet wurde und die X-Achse den angewendeten Curvature Gain (vgl. Serafin et al., 2013, S. 162).



ski und Fohl, 2016, S. 19).

Die Erforschung der akustischen DTs und der Beweis, dass RDW nicht rein visuell stattfinden muss, inspirierte weitere Arbeiten sich dem ARDW zu widmen. Hierzu ist ein Experiment besonders erwähnenswert, mit einem verhältnismäßig großen Raum, bei dem die Probanden\*Innen mit Kopfhörern, ohne von Lautsprechern umgeben zu sein, manipuliert werden sollten. Dabei wurde keine Zielquelle genutzt, auf die sich die Probanden\*Innen zu bewegen sollten. Es war damit nicht klar, ob die Probanden\*Innen dadurch überhaupt umgelenkt werden können.

Bei diesem Experiment von Feigl und seinen Kollegen im Jahr 2017 ging es um die Umleitung mittels Geräuschquellen. Dazu setzten sie 10 Probanden\*Innen, darunter 5 Männer und 5 Frauen, Kopfhörer auf und ließen diese in VR 20 Meter weit laufen. Die Geräusche wurden dabei binaural gerendert, um diese akustisch besser lokalisieren zu können. Die akustische und visuelle Umgebung wurde dabei so gestaltet, dass diese nicht zur Orientierung nutzbar war. Die einzige Orientierung für die Probanden\*Innen war dabei ein roter Punkt in der Mitte des Sichtfeldes, der sich mit deren Up-Achse mitbewegte. Das führte dazu, dass die Probanden\*Innen die eigenen Drehungen nicht bemerkten und somit die Abweichung vom Weg  $v$  nicht wahrnahmen, selbst wenn ihre reale Laufbahn  $r$  dabei anders verlief. Vom Startpunkt  $S$  bis zum Endpunkt  $E$ , in jeweils drei Durchläufen, wurde mit einem Laser gemessen, wie sehr diese dabei vom Weg abkamen (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1-2).

Der erste Durchlauf diente den Probanden\*Innen dazu sich an die Umgebung zu gewöhnen und mit diesem gelaufenen Pfad, die anderen Pfade mit Manipulationen, zu normalisieren. Bei diesem gab es daher keine Manipulation durch Geräusche. In den anderen beiden Experimenten befand sich vom Startpunkt aus nach 8 Metern Weg, einen Meter links neben dem Weg, eine Soundquelle mit Baustellengeräuschen. Diese wurden linear lauter, je mehr der\*die Proband\*In sich dieser näherte und leiser, wenn er\*sie sich von dieser entfernte, um natürlicher zu wirken und nicht plötzlich einzusetzen. Der Soundradius betrug dabei 8 Meter und bei der Nähe von einem Meter war die Quelle 65 Dezibel laut. Im zweiten Szenario lag diese auf dem Weg und verschwand wieder, wenn die Probanden\*Innen ihren Radius verließen, da sie konstant an einer Stelle blieb. Im dritten Szenario wanderte diese mit den Probanden\*Innen mit, sobald diese einen Meter von dieser entfernt waren und blieb links auf 1m Entfernung neben den Probanden\*Innen, bis diese den Endpunkt erreichten. Die Differenz des angestrebten Endpunktes  $E$ , der dem Ende eines geraden Weges entsprach und die des real erreichten Endpunktes  $\hat{E}$ , ergab die gemessene Distanz  $d$  (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2).

Wie die Abbildung 2.4 zeigt, wurden bei den drei Verfahren deutliche Unterschiede bei der Abweichung erzielt. Der individuell gelaufene Pfad des ersten Szenarios wurde dabei von den Pfaden der zwei mit Audio abgezogen, um diese nutzerspezifisch zu normalisieren. Die Probanden\*Innen sagten dazu alle aus, dass sie die Geräuschquelle als unangenehm empfanden, was auch beabsichtigt wurde. Die Abweichung vom statischen Audio

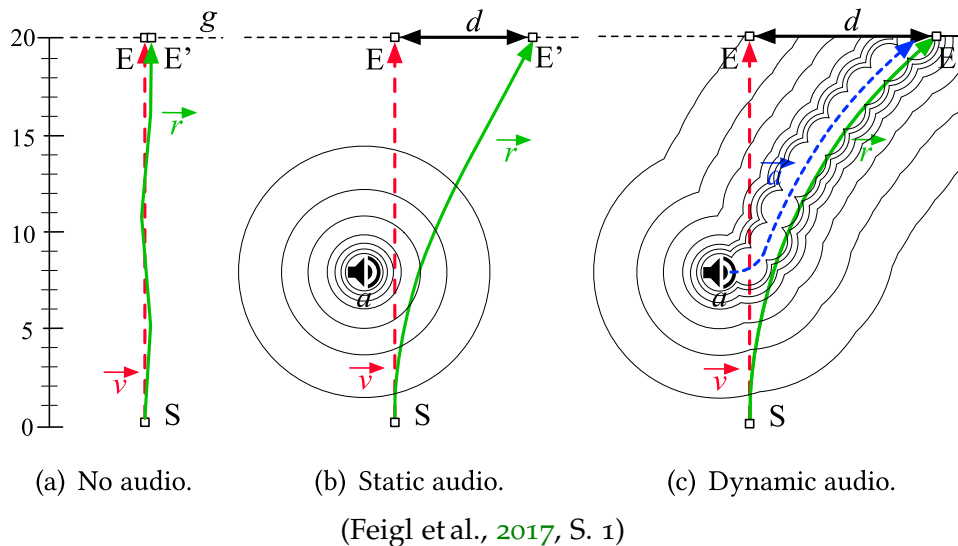


Abbildung 2.4: „(a) Zeigt das Szenario ohne Audioquelle (b) Das Szenario mit statischer Audioquelle (c) Das Szenario mit dynamischer Audioquelle (Feigl et al., 2017, S. 1)“.

lenkte die männlichen Probanden durchschnittlich um 3,92m vom Weg ab und die weiblichen um 3,38m. Das dynamische Audio erzielte dabei noch höhere Abweichungen bei den Männern von durchschnittlich 6,00m und bei Frauen eine deutlich geringere von 5,02m. Dies zeigte den Unterschied zwischen Männern und Frauen bei akustischen Manipulationen in RDW, was im Einklang mit den Ergebnissen früherer Studien ist. Die dabei erzielte gesteigerte Rotation der Probanden\*Innen, ausgehend von der Blickrichtung des Kopfes, lag hierbei zwischen  $14^\circ$  bis  $22^\circ$ , was um die 50% stärker war als bei vergleichbaren visuellen RDW-Verfahren, die vorher untersucht wurden. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass eine Audioquelle mit einer Entfernung von einem Meter stärker ist, als eine die sich immer weiter entfernt, wenn ein Proband an ihr vorbeigeht und zusätzlich, dass diese mindestens das Potenzial besitzen, Probanden in einem Radius von 29m im Kreis zu führen. Dies entspricht bei Männern einer Abweichung von bis zu 30% von der eigentlichen Gehrichtung und bei Frauen von 25%. Die Kombination dieser Technik mit visuellen Verfahren ist nach den Autoren damit vielversprechend und soll auch weiterverfolgt werden (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2). Diese gesammelten Erkenntnisse sowie der Ausblick den Feigl und seine Kollegen bei ihrem Experiment gegeben haben und die visuelle Manipulation beim Blinzeln, aus dem vorherigen Kapitel, geben die Grundlage für Audiovisuelles RDW, der Kombination aus ARDW und VRDW.

## AUDIOVISUELLES REDIRECTED WALKING

---

Die Möglichkeit, Probanden unbemerkt in VR zu drehen, während sie blinzeln aus Kapitel 2.2 und diese durch akustische, störende Soundquellen umzuleiten aus Kapitel 2.3, ergaben die Grundlage für das in diesem Kapitel vorgestellte Prinzip. Daraus resultierten folgende drei Forschungsfragen:

- Frage 1: Ist mit dem neu vorgestellten Prinzip eine akustisches und gesundheitlich verträgliches RDW realisierbar?
- Frage 2: Lässt es sich mit einem visuellen Verfahren kombinieren?
- Frage 3: Werden die in diesem Experiment angewendeten Manipulationen von den Proband\*innen bemerkt?

Dieses Kapitel präsentiert dazu die Methodik und stellt die Hypothesen vor.

### 3.1 SCHRITTGERÄUSCHE FEEDBACK

Die körperliche Selbstwahrnehmung spielt in VR für die Immersion eine wichtige Rolle, weshalb dieser Einflussfaktor auf RDW untersucht werden muss. Die virtuelle Präsentation der eigenen Füße und der Einfluss auf die Translation Gains wurde dazu von Kruse, Langbehn und Steinicke bereits untersucht (vgl. L. Kruse, E. Langbehn und F. Steinicke, 2018, S. 305).

Dabei fanden diese heraus, dass die Probanden die angewendeten Manipulationen besser erkennen konnten, wenn sie ihre Füße virtuell sehen konnten (vgl. L. Kruse, E. Langbehn und F. Steinicke, 2018, S. 310). Die Füße also nicht darzustellen, lässt damit auf ein besseres Ergebnis für RDW schließen. Eine weitere Frage war dazu, ob die akustische Präsentation von Schrittgeräuschen der haptischen unterlegen ist. Hierzu machte Turchet mit seinen Kollegen Versuche, in denen sie einen Audio-Haptischen-Schrittgeräusche-Synthesizer entwickelten (vgl. Turchet et al., 2010, S. 269).

Dabei kam heraus, dass die verwendeten haptischen Stimuli der Füße den akustischen unterlegen waren, was diese mit der geringeren Sensibilität der Füße erklärten (vgl. Turchet et al., 2010, S. 272-273).

Ein Ansatz aus diesen Erkenntnissen könnte somit die Wiedergabe von Klängen sein, die eine akustische Repräsentation der Füße schaffen. Diese können gleichzeitig einen Effekt auf die Gehrichtung der Nutzer haben, wie die dynamische Soundquelle bei dem Experiment von Feigl (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2).

Hierbei ist jedoch die Soundquelle, die dem Nutzer folgt, die virtuelle Repräsentation der eigenen Schrittgeräusche. Ein unangenehmes Geräusch dazu

könnten bestimmte Untergründe sein, wie Schlamm oder Pfützen mit Wasser. Diese müssten Bestandteil der Umgebung sein und darin so vorkommen, dass nur leichte Abweichungen, den Nutzer in diese treten lassen würden. Ein Szenario dazu könnte ein einfacher Kiesweg sein, dessen Ränder voller Wasser sind, nachdem es geregnet hat. Der Fokus wird dabei nicht auf den Weg gelenkt, sondern auf ein Objekt, auf das der Nutzer zugeht. Damit wird die Diskrepanz zwischen der vermeintlichen Fußposition und der akustisch dargestellten, minimiert. Hierzu wird ein neues Verfahren vorgestellt, das das Prinzip der Curvature Gains (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 24-25) und eine selbstentwickelte Step Detection nutzt.

### 3.1.1 Verfahren

In diesem Experiment gibt es drei Arten von Schritt-Geräuschen: Das Schrittgeräusch auf dem Kiesweg, auf hohem Gras und der Schritt ins Wasser. Hierbei sind alle Geräusche nicht per Schrittgeräusch-Synthesizer erzeugt, wie von Turchet (vgl. Turchet et al., 2010, S. 269), sondern wurden mit einem Mikrofon aufgenommen. Auf alle Sounds wurde eine Rauschreduktion angewendet. Sie wurden außerdem durch ein natürliches, permanentes Umgebungsgeräusch, vom Wind auf einem Feld, in eine passende Klangkulisse eingebettet. Diese dient zum Überspielen der Schrittgeräusche der Probanden auf dem realen Boden (vgl. Razzaque, Kohn und Whitton, 2001, S. 105-108). Zusätzlich wurden physische Schrittgeräusche, durch die Dämpfung, mittels weicher Schuheinlage in den Hausschuhen, weiter reduziert. Die in dieser Arbeit verwendeten Sony WH-1000XM3 besitzen zusätzlich ein integriertes Noise Cancelling, das zu dem gleichen Zweck verwendet wurde. Die Auswahl des Schrittes in das Wasser wurde nach der Pilotstudie ausgewechselt. Ursprünglich war dies ein Geräusch, das Matschboden dargestellt hat. Bei den Probanden schien dies jedoch nicht unterscheidbar genug zum Schrittgeräusch im Gras. Darum fiel die Wahl auf ein deutliches unterscheidbares Geräusch, das passend zur Kulisse wirken sollte. Wie in dem Szenario von Feigl sollten die Probanden von ihrer Startorientierung aus nach rechts abgelenkt werden (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1-2). Dazu wurde das störende Wassergeräusch abgespielt, sobald diese virtuell nach links vom Weg abgekommen.

Die akustische Abweichungsfunktion  $A(x)$  vom virtuellen Weg, verhält sich ähnlich wie der von Steinicke definierte Right-Vector (vgl. Steinicke et al., 2008, S. 151) aus dem Kapitel 2.1. Dieser wird bei dieser Funktion nur zunehmend negativ. Wobei die Intensität  $i$  der zunehmenden Abweichung mit  $i = 0,1$  in dieser Arbeit verwendet worden ist. Bei einem Ergebnis von  $< -0,8m$  wird dabei der Schritt ins Gras abgespielt und zwischen  $-0,8m$  und  $-0,2m$  das Wassergeräusch. Bei einem Ergebnis von  $> -0,2m$  wird immer das Kiesgeräusch abgespielt. Diese drei Sound-Layer dienen damit zur Orientierung. Dazu wird der Right Vector als  $\vec{r}$  definiert. Die Startdistanz  $s_1 = 20m$  und die aktuelle Distanz  $s_2$  ist die Distanz zum Zielobjekt, die zu Beginn auch bei 20 liegt.

Da sich die Probanden dem Haus zunehmend nähern, kann dies zu einer Diskrepanz bei der akustischen Wahrnehmung des Weges und der visuell wahrgenommenen Position des Hauses geben. Deshalb muss  $A(x)$ , bei geringerer Distanz zum Ziel, 0 approximieren. Dafür wird eine Funktion  $E(x)$  zum Ausblenden der Manipulation aufgestellt mit  $E(x) := 1 + \frac{-1}{1 + (\frac{x}{3})^{10}}$ . Diese

wird in der Abbildung 3.1 dargestellt. Zu der Funktion ist anzumerken, dass

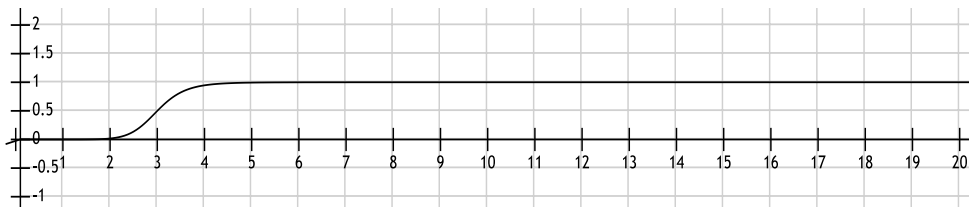


Abbildung 3.1: Die Funktion  $E(x)$  zum Ausblenden der Manipulation, bei der die X-Achse die Distanz in Metern zum Zielpunkt darstellt und die Y-Achse die Stärke der Manipulation.

eine Distanz zu einem Punkt nicht negativ sein kann, weshalb der negative X- und Y-Bereich der Funktion nicht betrachtet werden muss. Damit kann  $A(x)$  vollständig beschrieben werden mit  $A(x) := \vec{r} - (s_1 - s_2) \cdot i \cdot E(x)$ . Zu Beginn eines Durchlaufes ist  $\vec{r} = 0$  daraus ergibt sich eine akustische Abweichung von  $0 - (20 - 20) \cdot 0,1 \cdot 1 = 0$ . Beim ersten Meter ist  $\vec{r}$  wahrscheinlich auch nahe bei 0, da davon ausgegangen werden kann, dass die Probanden in den ersten Metern gerade auf das Ziel zugehen. Das ergibt:  $0 - (20 - 19) \cdot 0,1 \cdot 1 = -0,1$ . Damit würde nach 2 Metern das Wassergeräusch eingeblendet werden. Um dies auszugleichen, müsste  $\vec{r} = +0,2m$  sein. Die Manipulation erst nach ca. 2 Metern einsetzen zu lassen ist dabei aus dem Curvature Gain Szenario von Steinicke aus Kapitel 2.1 inspiriert. Diese Meter ohne Manipulation dienen dazu die Probanden an das Laufen in VR zu gewöhnen (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 24-25). Falls die Probanden sich nur an dem Wassergeräusch orientieren würden, wäre damit eine maximale Abweichung nach rechts von 2 Metern möglich, wenn die Ausblendfunktion dabei nicht betrachtet wird. Es wird jedoch von einer höheren Abweichung vom Zielpunkt ausgegangen, da die statische Soundquelle in dem Experiment von Feigl zu einer Abweichung geführt hat, bei der die Proban-

den ihre Gehrichtung nach dem Geräusch nicht zurück in die ursprüngliche Gegenrichtung korrigiert haben. Dieses Verhalten ist in der Abbildung 2.4 im Kapitel 2.3 (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1) zu sehen.

Da sich die Probanden in diesem Experiment auf ein Haus zubewegen und durch die akustische Manipulation zunehmend vom Weg abweichen könnten, bewegt sich das Haus dabei maximal 3,5 Meter mit dem Right-Vector der Probanden mit, solange dieser einen positiven Trend aufweist. Der Proband geht in diesem Fall nach rechts. Dieses Prinzip ist in der folgenden Abbildung 3.2 visualisiert. Dieses Prinzip ist inspiriert von dem Punkt in

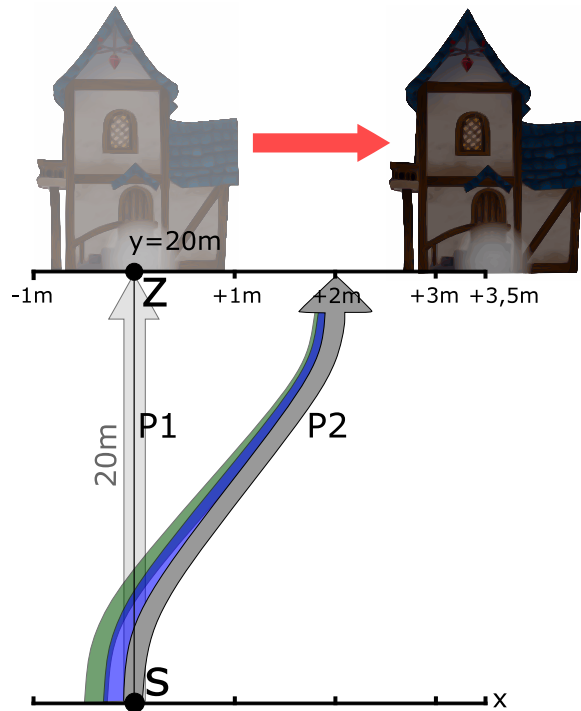


Abbildung 3.2: Ein Beispielszenario mit dem Startpunkt S und dem Zielpunkt Z. Der dünne Pfad P1 soll den wahrgenommenen geraden Pfad abbilden und P2 den akustischen illustrieren. Wobei die blaue Farbe für das Wassergeräusch und die Grüne für das Grasgeräusch stehen soll. P2 hat in diesem Szenario nach 20 Metern eine niedrigere Distanz zu Z, als das Haus. Die Proportionen sind hierbei nicht korrekt gewählt, um die Darstellung zu vereinfachen.

Feigls Szenario, der sich mit der Up-Achse mitbewegt hat (vgl. Feigl et al., 2017, S. 1-2). Dieses Mitbewegen des Hauses wird in den letzten 2,5 Metern Distanz zur Zielgeraden deaktiviert, analog zu dem Ausblenden der akustischen Abweichung.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren ist ein akustischer Curvature Gain, da die Probanden vermittelt bekommen vom Zielpfad abzuweichen und dies mit einer Ausgleichsbewegung korrigieren, ohne zu merken, dass sie physisch vom geraden Weg abkommen (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 24-25). Die DTS von Serafin aus Kapitel 2.3 lassen dabei deutliche Potenzia-

le erkennen (vgl. Serafin et al., 2013, S. 161-162). Diese müssen in weiteren Experimenten noch ergründet werden. Die Ziele aus Kapitel 1.3 haben als Prämisse, dass das Acoustic-Step-Feedback-RDW (ASRDW) überhaupt funktioniert. Aus der Frage 1 zu Beginn dieses Kapitels resultiert folgende zu prüfende Hypothese H1:

- H1: Das in dem Experiment angewendete ASRDW erzielt durchschnittlich eine höhere positive Abweichung vom Zielpunkt als keine angewendete Manipulation.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H1 lautet dafür: Das in dem Experiment angewendete ASRDW erzielt durchschnittlich eine kleinere oder gleiche Abweichung wie keine angewendete Manipulation.

Da hierbei ein akustischer Curvature Gain angewendet wird, der nicht versucht die Potenziale auszureizen, wird davon ausgegangen, dass die Manipulation in den meisten Fällen unbemerkt bleibt, womit die Frage 3 beantwortet werden kann:

- H2: Dass sich die Probanden während des ASRDW-Szenarios nicht auf den Zielpunkt gerade aus zubewegt haben, wird in den meisten Fällen von diesen nicht bemerkt.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H2 lautet dafür: Dass sich die Probanden während des ASRDW-Szenarios nicht auf den Zielpunkt gerade aus zubewegt haben, wird von diesen durchschnittlich bemerkt.

Um die Perzeption der Schrittgeräusche in VR zu realisieren und das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren testen zu können, wird dementsprechende Hardware benötigt. Dafür wurde eine Step Detector für das Experiment entwickelt, der in dem nächsten Kapitel vorgestellt wird.

### 3.1.2 Step Detector

Bei der Entwicklung der Schritterkennung wurde darauf geachtet, eine möglichst niedrige Latenz zwischen den virtuellen Schrittgeräuschen und dem realen haptischen Feedback zu erreichen. Die Sensorik wurde dabei so minimalistisch gehalten wie möglich, um das Risiko der softwareseitigen Fehlinterpretation von Sensorsignalen zu minimieren. Als Sensoren wurden dazu zwei Force Sensitive Resistors (FSRs) benutzt für den Fußballen und die Ferse. Diese Konstruktion ist nicht neu und wurde bereits in der Art von Turchet verwendet (vgl. Turchet et al., 2010, S. 271).

Die in diesem Experiment verwendeten FSRs sind flexible  $< 0,6\text{mm}$  dicke Dünnschicht-Drucksensoren mit einem  $< 1\text{ms}$  Response und einer  $< 15\text{ms}$  Recovery-Zeit. Der Messbereich liegt zwischen 10g und 30kg und sie sollen nach Herstellerangaben eine Haltbarkeit von  $> 1$  Million Nutzungen aufweisen. Sie wurden aufgrund dieser geringen Latenz und Beschaffenheit ausgewählt.

Im Gegensatz zu der Konstruktion von Turchet, bei der diese Sensoren in Sandalen verbaut wurden (vgl. Turchet et al., 2010, S. 271), sollten ursprünglich alle Arten von Schuhen und Schuhgrößen unterstützt werden, um einen möglichen Effekt durch unbequemes Schuhwerk ausschließen zu können. Dazu wurden Sohlen für die Probanden zugeschnitten, unter die die Sensoren geklebt wurden. Dies ist in der folgenden Abbildung 3.3 zu sehen.

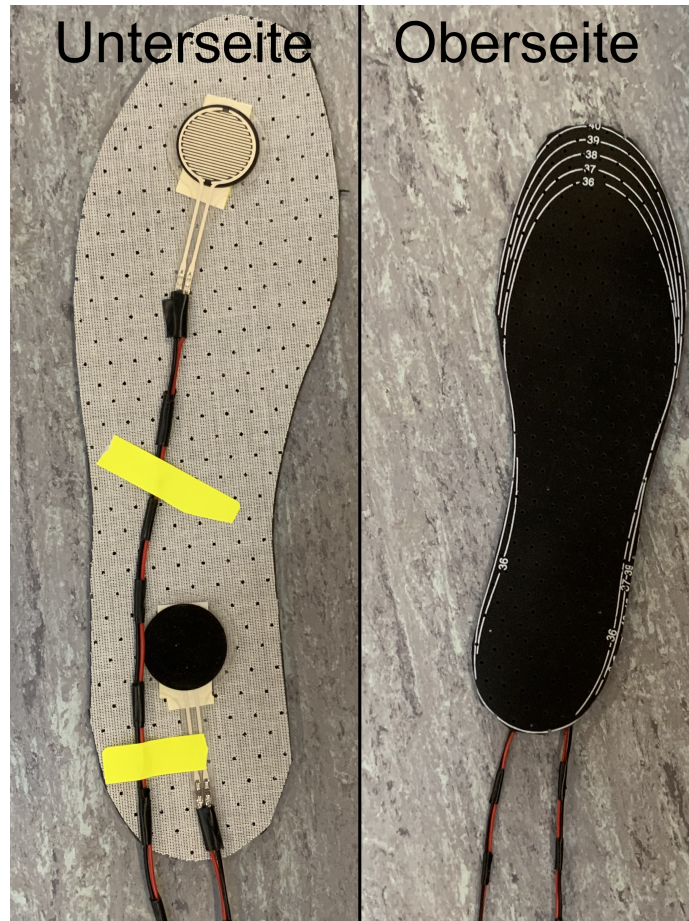


Abbildung 3.3: Unterseite der Sohle an der die Sensoren angebracht sind und die Oberseite.

Die Möglichkeit das eigene Schuhwerk zu nutzen, wurde nach der Pilotstudie verworfen, da hierbei die Sensoren teilweise gerissen sind oder durch das Gangbild so gebogen wurden, dass sie nicht mehr funktionierten. Um ungeplante Sensorausfälle während der Experimente zu verhindern, wurden diese mit einer weniger flexiblen Kunststoffplatte stabilisiert. Als Zugentlastung für die Sensoren und Kabel wurden diese mit einer zusätzlichen Folie ummantelt, die sich flexibel auf deren Oberfläche bewegen konnte, ohne daran zu kleben. Diese wurden dann unter der Schuhsohle angebracht, die in Pantoffeln geklebt wurden. Die Vorteile und Eigenschaften der verwendeten Pantoffeln sind:

- Verhältnismäßig schnelle und einfache Montage von Sensoren durch halboffenen Innenraum.



- Relativ einheitliche und leise Schrittgeräusche durch Dämpfung mittels weicher Sohlen im Vergleich zu individuellem Schuhwerk.
- Rutschfeste Sohle für den Hallenboden.
- Sie sind mittels zweier Ösen und elastischem Band modifiziert, sodass sie nicht beim Tragen verloren werden können.
- Sie können leicht desinfiziert werden.
- Die Sohle wird wenig belastet, da sie nicht eng am Fuß sitzt.
- Die Probanden können sie leicht an und ausziehen, ohne Verschlüsse.
- Hoher Tragekomfort im Vergleich zu unbekanntem Schuhwerk.

Diese genannten Eigenschaften sind zum Teil subjektiv, da sie nicht in diesem Experiment belegt werden können und auf der Wahrnehmung des Autors beruhen. Sie sollen lediglich die Entscheidungsgrundlage vermitteln, nach der sie für dieses Experiment gewählt worden sind. Eine Größe der verwendeten Pantoffeln ist in der nächsten Abbildung 3.4 zu sehen.

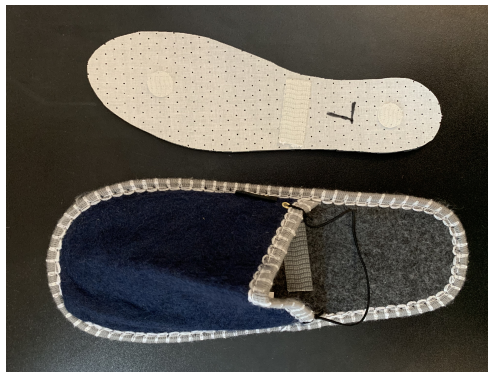


Abbildung 3.4: Eine der verwendeten Pantoffeln.

Die Kabelführung, in der Abbildung 3.5, wurde mit Klettbindern und einem Universalgürtel realisiert, um diese unabhängig des Hüftumfanges oder Beinlänge rutschfest anzubringen. Wie bei den Sohlen wurde hierbei auf eine Zugentlastung der Kabel geachtet und gleichzeitig darauf, dass die Probanden über dieses nicht stolpern konnten. Für diesen Sonderfall wurden die Sensoren an der Hardware mit Steckverbindungen angebracht, um Schäden am Mikrokontroller oder der Schaltung zu verhindern. Diese wurde mittels eines 3D gedruckten Gehäuses in einem Rucksack verstaut. Dieses ist in Abbildung 3.6 zu sehen. In dem Gehäuse bekamen sie eine zusätzliche Hülle, für den Fall, dass das PLA äußerlichen Auswirkungen nicht standhält. Diese wird auf Abbildung 3.7 gezeigt.



Abbildung 3.5: Die Realisierung der Kabelführung.



Abbildung 3.6: Das Gehäuse des Step Detectors.

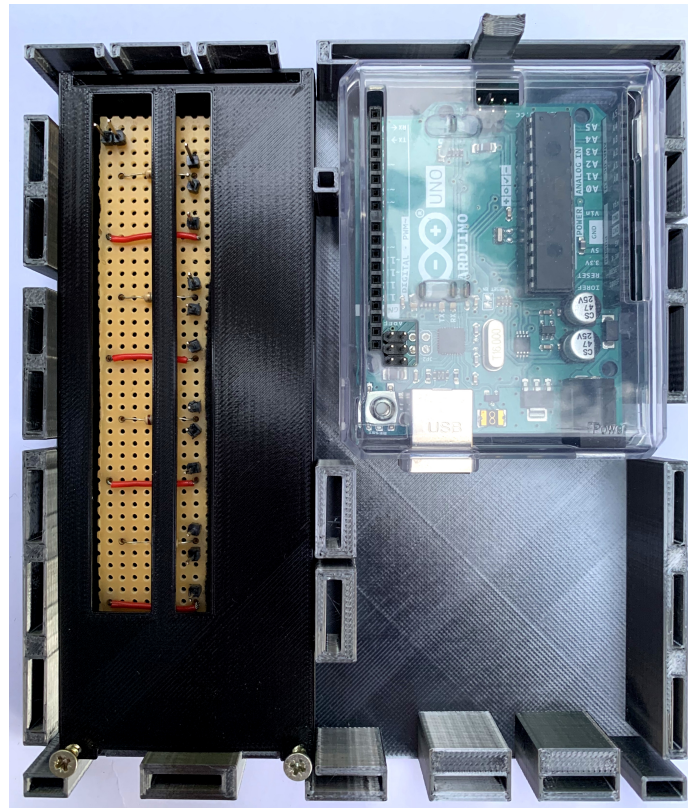


Abbildung 3.7: Die Schaltung ist links im Bild zu sehen und der Arduino UNO rechts.

Der verwendete Mikrokontroller muss für die 4 Sensoren analoge Ports bereitstellen und die Signale möglichst schnell verarbeiten und weiterleiten können. Der Use Case erfordert in diesem Experiment keine Konfiguration durch den Nutzer, wodurch das verwendete System nur unidirektionale Signale an den verwendeten Laptop weiterleiten muss. Anhand dieser Kriterien wurde ein Arduino Rev 3 ausgewählt, der 6 analoge Pins bereitstellt. Die Stromversorgung und Datenübertragung verlaufen dabei über den USB-A Port des Controllers zu einem USB-B Port am verwendeten Laptop. Der Aufbau der Schaltung ist in der folgenden Abbildung 3.8 als Schalt diagramm aufgeführt.

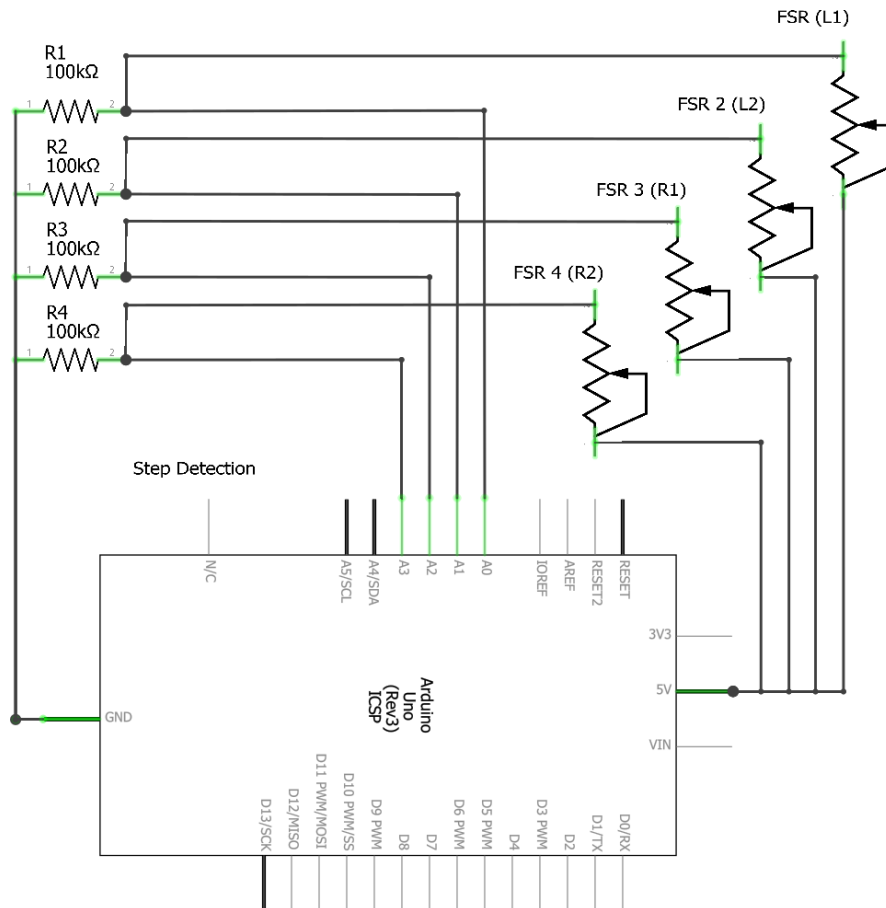


Abbildung 3.8: Die Schaltung zwischen dem Arduino und den Druck-Sensoren

Die Sensoren sind in der Abbildung 3.8 mit FSR benannt und durchnummeriert. L1, L2 stehen dabei für die beiden Sensoren am linken Fuß und R1, R2 für die am rechten Fuß. R1-R4 sind die verwendeten 100kΩ Widerstände. Die Ports A0-A3 sind die verwendeten Analogen Ports, 5V ist der Port für die Stromversorgung und GND ist Ground. Die Anwendungslogik des Step Detectors wurde mittels der Arduino IDE in C programmiert. Die Funktionsweise wird in einem Aktivitätsdiagramm in der folgenden Abbildung 3.9 dargestellt.

Der Anfangszustand bildet dabei nicht den wirklichen Initialzustand des Programmes ab, sondern ist ein Moment im Intervall nach dem Endzustand. Der Endzustand zeigt analog auch nicht an, wann das Programm terminiert, sondern ist der Moment in dem Intervall, an dem ein Signal über die COM3 Schnittstelle gesendet wird. Sie illustrieren damit einen Durchlauf, der bis zur Übertragung eines Signales führt. Zu erwähnen ist, dass diese Logik pro Fuß unabhängig ausgeführt wird, da beim Auftreten keine Zusammenhänge zwischen den Füßen erkennbar waren. Die Kantenübergänge enthalten dabei zum Teil Bedingungen, in denen die Variable „Signal“ vorkommt. „Signal“ steht dabei für einen Integer Wert zwischen 0-1023 der vom Analog Digital Converter des Mikrocontrollers ermittelt wird. Mit diesem lässt sich die Signalstärke leichter darstellen. Zu betrachten ist dabei, dass die Signalstärke nicht linear zunimmt und es hierbei pro Sensoreinheit nochmal Unterschiede im Signalanstieg bei gleichem Druck gibt. Deswegen müssen die hier angegebenen Werte je nach Modell möglicherweise angepasst werden. Vereinfacht war bei einer Signalstärke von >900 ein Druck von über 5 Kilogramm erreicht, was als starker Auftritt mit dem Fuß interpretiert wird. Ein Wert zwischen 500-900 ist ein leichter Schritt und darunter wird kein Schritt erkannt. Das jeweils dominantere Signal, der beiden Sensoren pro Fuß, wird ausgewertet und gespeichert. Nach dem Prinzip einer FIFO-Queue, wird bei den Iterationen eine Sequenz ermittelt, die solange erneuert wird, bis sie gültig ist. Senden dabei die Sensoren über 1000 Iterationen lang kein Schrittsignal wird ein Time Out gesendet. Dies dient zur Kontrolle bei einem Sensordefekt. Ein starkes Signal, vor dem kein Schritt erkannt wurde, ist dabei eine Abbruchbedingung die direkt als erkannter Schritt interpretiert wird. Eine ungültige Sequenz für einen Schritt wäre zum Beispiel: „starker Schritt“, „leichter Schritt“, „leichter Schritt“, „starker Schritt“. Diese kann willkürlich bei Gewichtsverlagerungen beim Stehen auftreten. Es darf daher im Falle eines „leichten Schrittes“ nachdem ein „starker Schritt“ vorgekommen ist, nicht direkt ein Signal ausgelöst werden. Diese Prüfsequenz könnte zur Ermittlung unterschiedlicher Bewegungsarten bei Bedarf verlängert werden. Das FIFO-Prinzip, das nur das älteste Sequenzelement entfernt und die Abbruchbedingung haben den Vorteil, dass ein gültiger Schritt innerhalb von 15ms bis maximal 60ms erkannt wird. Der Fokus wurde damit, wie bei der Hardware, auf eine möglichst schnelle Signalverarbeitung gelegt.

Der für dieses Experiment entwickelte Step Detector ist eine essenzielle Grundlage für eine möglichst latenzfreie, immersive Wahrnehmung der eigenen Schrittgeräusche. Das im Kapitel 3.1.1 vorgestellte ASRDW und die dazu aufgestellten Hypothesen sind damit von der Qualität der Schritterkennung abhängig. Daher muss diese in der Befragung und der Evaluation in den späteren Kapiteln noch bewertet werden.

Nachdem in diesem Kapitel das akustische Szenario vermittelt wurde, wird im nächsten das Pendant dazu vorgestellt: Das optische Manipulationsverfahren mit der dazu verwendeten Hardware.

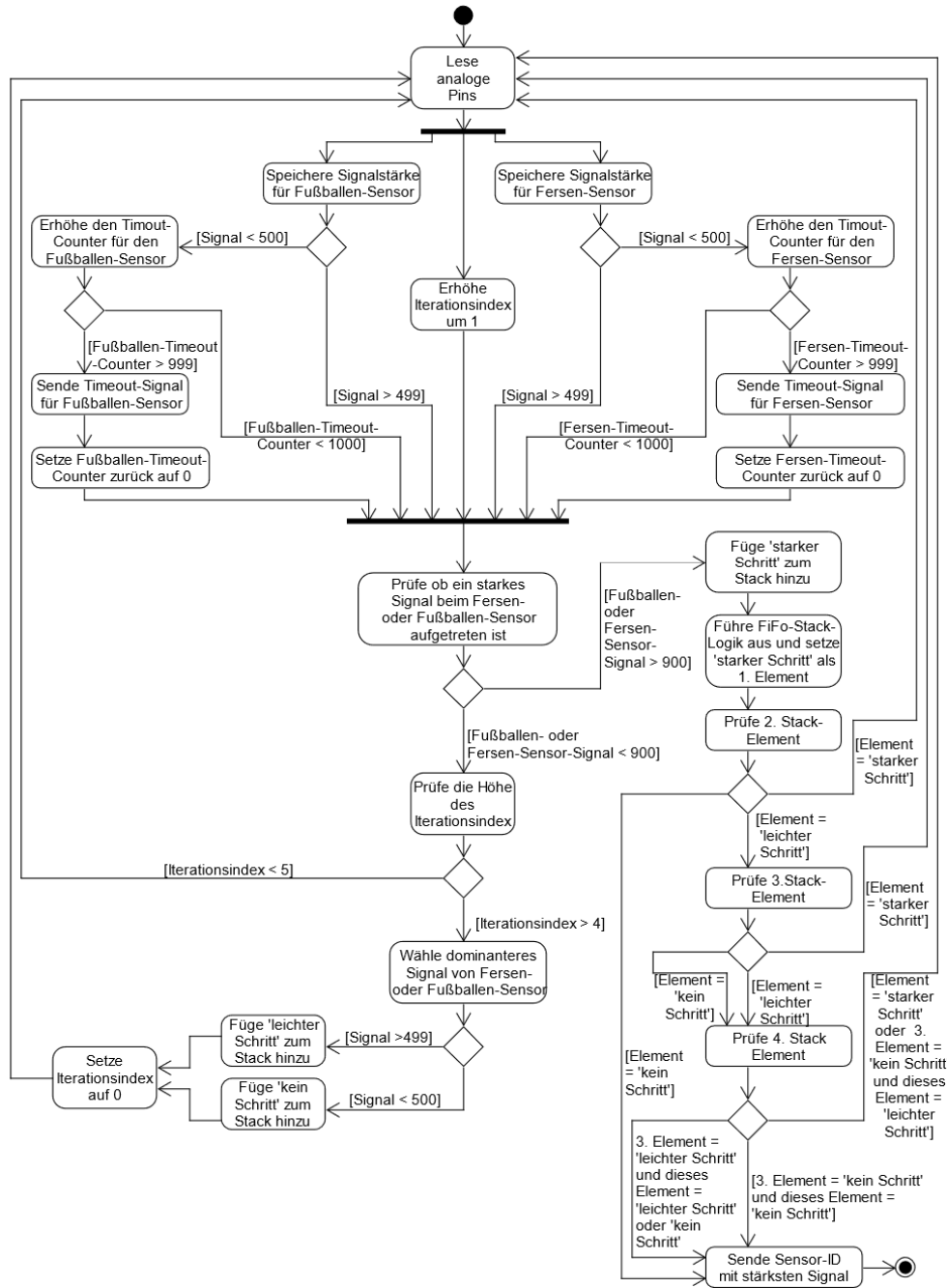


Abbildung 3.9: Funktionsweise des Step Detectors als Aktivitätsdiagramm

### 3.2 EYE BLINKING

Das im Kapitel 2.2 vorgestellte Verfahren, bei dem die Probanden während des Blinzeln rotiert werden (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 1), wird in diesem Kapitel weiter ausgeführt. Die Anwendung soll dabei ergänzend zu dem ASRDW aus Kapitel 3.1.1 sein und dieses nicht neutralisieren. Ob es einen eher positiven, neutralen oder gar negativen Effekt hat, wird im Experiment untersucht. Die nächsten beiden Kapitel spezifizieren das implementierte Verfahren mitsamt der genutzten Technologie und stellen dazu die Hypothesen vor.

#### 3.2.1 Verfahren

Betrachtet man bisher ermittelte DTS bei Szenenrotationen während des Blinzeln, so werden diese bei geschlossenen Augen mit bis zu  $9,1 \pm 3,2^\circ$  angegeben und bei offenen sogar mit  $2,4 \pm 0,97^\circ$  (vgl. Nguyen und Kunz, 2018, S. 5). Diese DTS treffen jedoch keine Aussage darüber, ob eine Manipulation erkannt wurde oder nicht, sondern wie diese interpretiert wird. Die  $-0,6^\circ$  Rotation, bei beiden geschlossenen Augen, um die Up-Achse, die in dieser Bachelorarbeit angewendet wird, liegt in einem sehr niedrigen Bereich, nahe des PSEs von Langbehn (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 7). Es wurde außerdem darauf geachtet, dass kurz hintereinander stattfindendes Blinzeln unterbunden wird, um die Manipulation nicht darüber wahrnehmbar zu machen. Zwischen einem erkannten Blinzler und dem nächsten muss dafür eine Sekunde vergehen, um die nächste Manipulation auszuführen. Da in diesem Experiment die nicht-bemerkbare Manipulation im Fokus steht, werden hierbei, wie beim ASRDW, nicht die Potenziale ergründet. Um beantworten zu können ob dieses Verfahren bemerkt wird und unabhängig funktioniert, um kombinierbar mit ASRDW zu sein, stellt der Autor folgende Hypothesen auf:

- H<sub>3</sub>: Die angewendete optische Manipulation bleibt während der Durchläufe von den Probanden unbemerkt.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H<sub>3</sub> lautet dementsprechend: Die angewendete optische Manipulation wird während der Durchläufe von den Probanden bemerkt.

- H<sub>4</sub>: Die angewendete optische Manipulation erzielt eine höhere, positive Abweichung vom Zielpunkt, im Durchschnitt, als das Szenario ohne Manipulation.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H<sub>4</sub> lautet: Die angewendete optische Manipulation erzielt durchschnittlich eine kleinere oder gleiche Abweichung vom Zielpunkt wie das Szenario ohne Manipulation.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren birgt Risiken bei einem Szenario ohne genügend visuelle Orientierungspunkte. Um den optischen Reiz

nicht zu weit zu reduzieren, wurde in dem Szenario 8 Meter vor dem Haus, auf dem Weg, ein helles Objekt platziert. Dies ist halbtransparent und stellt eine Lichtquelle dar. Da der Weg nur vor Beginn des Durchlaufes sichtbar ist, dient es als zusätzliche Orientierung. Es ist im Szenengraph der Unity Engine (Version 2019.2.15f1) ein Child-Objekt vom Haus und wird bei dessen Translationen mitbewegt. Als weitere Orientierung neben dem Haus und der Lichtquelle könnte noch der Sternenhimmel genutzt werden. Dieser wurde möglichst einfach gehalten, um nicht von dem eigentlichen Ziel des Szenarios abzulenken, bei einer durchschnittlichen Blinzelfrequenz von  $13 \pm 5.5x$  pro Minute (vgl. Nguyen und Kunz, 2018, S. 5).

Die durchschnittliche Gehgeschwindigkeit unterscheidet sich nach der Altersgruppe der Probanden. Da der Altersdurchschnitt wahrscheinlich zwischen jung und mittelalt liegen wird, wird von einer durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit von 1,06m ausgegangen (vgl. Fitzpatrick, Brewer und Turner, 2006, S. 28). Damit würde das Szenario durchschnittlich mindestens 18,86 Sekunden dauern, was durchschnittlich 4 Blinzlern im gesamten Durchlauf entsprechen würde. Bei einer Rotation von  $-0,6^\circ$  pro Blinzler entspräche das einer maximalen positiven Abweichung von 0,84m vom Zielpunkt. Da jedoch nicht klar ist, zu welchem Zeitpunkt im Szenario geblinzelt wird oder wie oft, kann dazu auch keine aussagekräftige Funktion aufgestellt werden.

Im Gegensatz zu der Neuentwicklung des Step Detectors aus Kapitel 3.1.2 wird für dieses Verfahren eine fertige Hardwarelösung genutzt, die im nächsten Kapitel mitsamt der Software genauer vorgestellt wird.

### 3.2.2 Pupil Labs

Pupil ist ein plattformunabhängiger Eye Tracker, dessen modulare Softwarebasis ein Open Source Projekt ist. Er wurde von Kassner, Patera und Bulling entwickelt, um eine offene Plattform für die Forschung und Entwicklung zu schaffen. Diese steht im Kontrast zu den kommerziellen Lösungen, die meist eine intransparente Entwicklungsbasis bieten sowie verhältnismäßig teuer und unflexibel für neue Anwendungen sind. Das leichtgewichtige Headset besteht aus zwei hochauflösenden Infrarot-Kameras, die unterhalb der Augen sitzen. Pupil ermöglicht die Analyse der Blickbewegungen beider Augen, in einer Prozess-Pipeline, die für die gesamte Verarbeitung nur 0,045 Sekunden benötigt. Der Tracker kann nutzerspezifisch kalibriert werden. Dabei ist die Erkennung des realen visuellen Blickwinkels bis auf  $0,6^\circ$  genau (vgl. Kassner, Patera und Bulling, 2014, S. 1-2).

Bei diesem Experiment wurden fertige Softwarekomponenten von Pupil Labs genutzt. Die verwendete Software ist Pupil Capture v2.1.0 und ist auf der Abbildung 3.10 zu sehen. In Kombination mit dem vom Pupil Labs bereitgestellten Unity-Plugin, übermittelt sie die Eye-Tracking-Daten der beiden Kamerastreams in Echtzeit. Die Software ist auch Open Source und überwiegend in Python und C programmiert. Die Bildverarbeitung und die daraus resultierende Computer Vision ist über das User Interface der Software, pro



Videostream, direkt sichtbar (vgl. Kassner, Patera und Bulling, 2014, S. 3-4). Die Hardwareauswahl fiel dabei auf das HTC Vive Add-On von Pupil Labs,

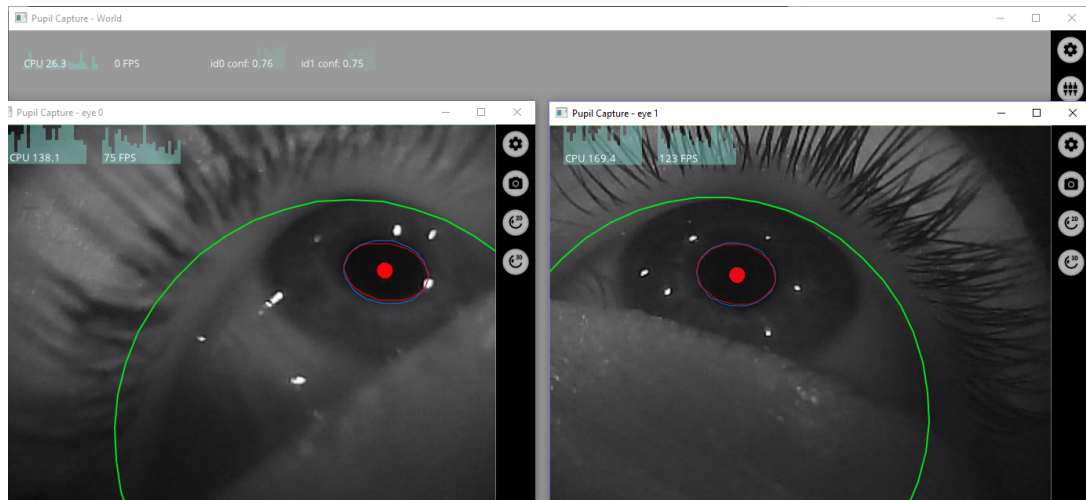


Abbildung 3.10: Pupil Capture mit den Videostreams beider Augen und dem Conf (Konfidenzwert) und FPS

welches auf der Abbildung 3.11 gezeigt wird. Dieses ermöglicht die HTC Vive mit einem Eye-Tracker auszustatten. Die Kameras laufen dabei beidäugig mit 200 Hz (HTC Vive Add-On | Pupil Labs 2020).



Abbildung 3.11: Das HTC Vive Add-On im HMD

Die softwareseitige Umsetzung orientiert sich an dem Prinzip aus dem Experiment aus Kapitel 2.2. Die Blink Detection von Langbehn und Steinicke nutzt dabei den Konfidenzwert von Pupil Labs, um damit zu bestimmen, ob gerade ein Blinzler stattfindet oder nicht. Dieser Wert dient dazu die Genauigkeit des Eye Trackings anzugeben und liegt zwischen 0 und 1. Sind die Augen geschlossen, liegt dieser bei gegen 0 beziehungsweise kleiner als 0,01. Bei offenen Augen sollte dieser Wert nach der Herstellerempfehlung bei über 0,6 liegen. Bleibt dieser Wert in dem Bereich von unter 0,01 für über 300ms, ist die Wahrscheinlichkeit für einen Blinzler hoch. Dies haben sie in einem kleinen Experiment mit drei Probanden zusätzlich geprüft. Die softwareseitige Umsetzung erfolgte hierbei auch in Unity3D (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 5). Auf der nächsten Abbildung 3.12 wird gezeigt, wie der Konfidenzwert (Conf) beispielsweise fällt, sobald die Augen geschlossen sind. Die in dieser Arbeit verwendete Logik dazu ist in C# programmiert und in der folgenden Abbildung 3.13 als Aktivitätsdiagramm abstrahiert: Im Gegensatz zu dem Step Detector aus Kapitel 3.1.2, muss die Logik des Blink Detectors beide Augen berücksichtigen. Nur wenn beide Augen geschlossen sind und damit von der Hardware ein Konfidenzwert gegen 0 übermittelt wird, kann die Manipulation ausgeführt werden. Als weitere Prämisse muss darauf geachtet werden, dass nicht zu lange ein niedriger Konfidenzwert besteht, der zwischendurch willkürlich bei 0 landet. Ist der Konfidenzwert dauerhaft in einem Bereich von unter 0,6, ist der Eye-Tracker nicht richtig konfiguriert oder kann das Auge nicht richtig erfassen. Dies wird in diesem Diagramm als unbekannt definiert. Dies verhindert das Blinzler erkannt werden, obwohl keine stattgefunden haben. Sind beide Augen jeweils zwei Iterationen lang geschlossen und der letzte Blinzler schon eine Sekunde her, so wird ein

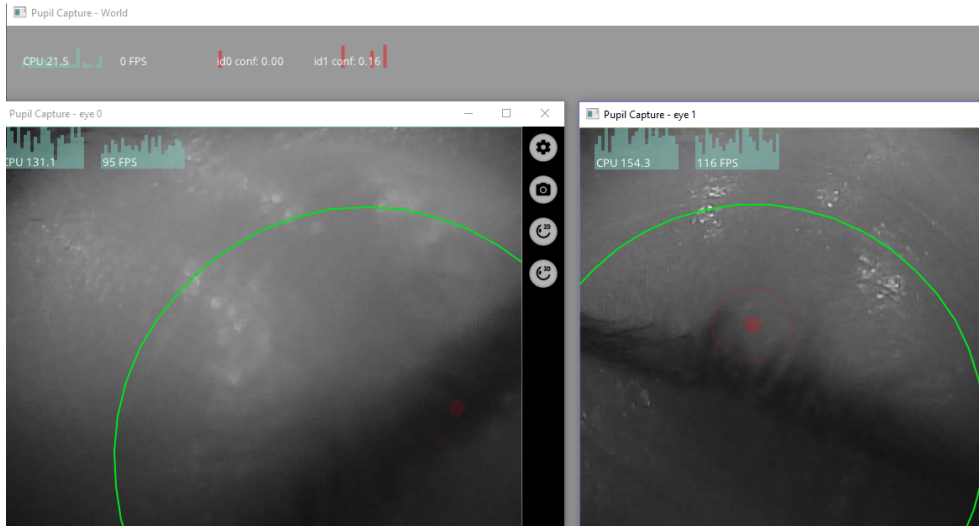


Abbildung 3.12: Eine Ansicht Pupil Captures bei geschlossenen Augen. Das rechte Auge hat hierbei noch keinen Konfidenzwert von 0.

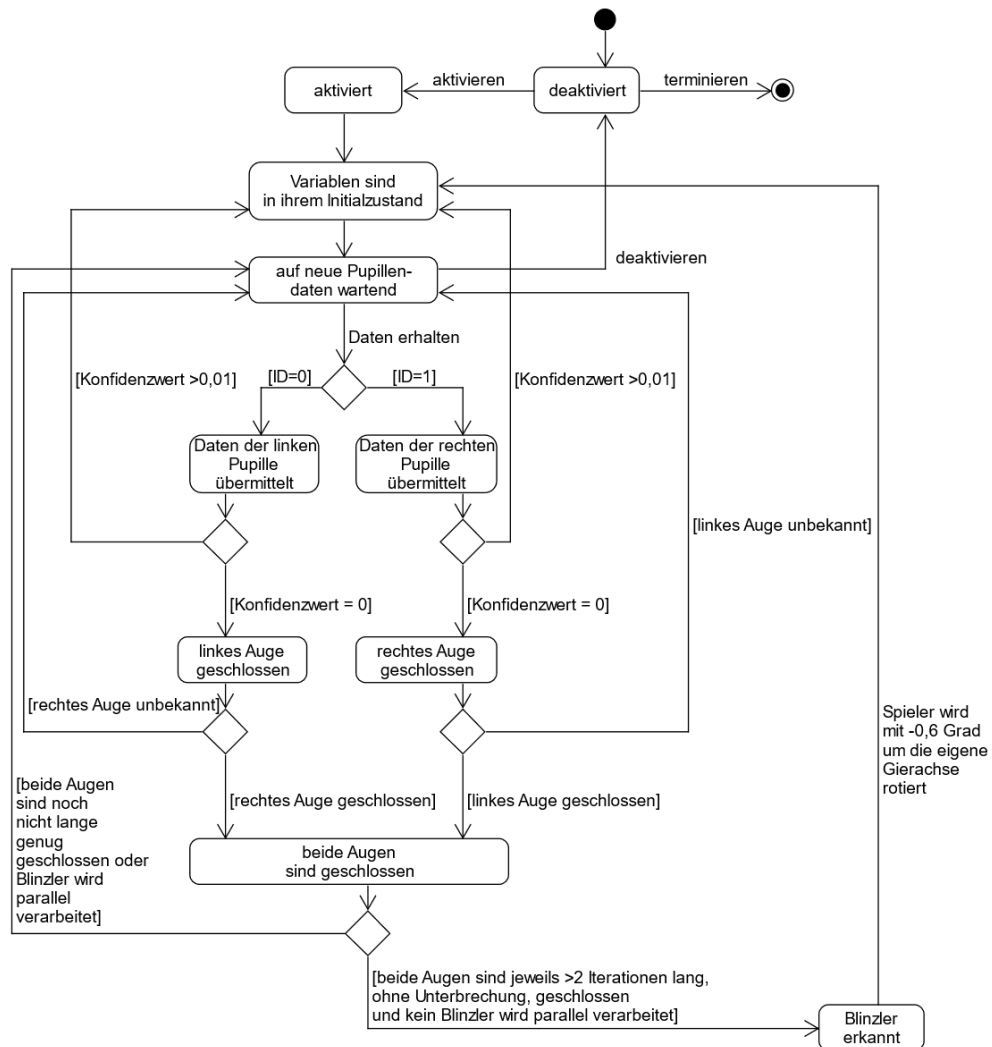


Abbildung 3.13: Die Logik der Blink Detection als Aktivitätsdiagramm.

neuer Blinzler erkannt. Die Iterationen dienen nur als zusätzliche Sicherheit, falls willkürlich ein Konfidenzwert bei 0 landet und sollten nicht zu lang sein, um nicht den Moment der geschlossenen Augen zu verpassen.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren muss mit ASRDW aus Kapitel 3.1.1 kombinierbar gemacht werden, damit die dabei erzielte Umleitung nicht die Manipulation des ASRDW abschwächt. In dem nächsten Kapitel wird dazu die Kombination der beiden Verfahren beschrieben und das dafür ausgewählte HMD vorgestellt.

### 3.3 KOMBINATION

Aus dem VRDW des letzten Kapitels ergeben sich Bedingungen an die virtuelle Umgebung des Szenarios, die bei dem akustischen mitbedacht werden müssen. Wird der/die Proband\*In zum Beispiel rotiert und gleicht dieses mit einer Gegenbewegung aus, führt dies auch zu einem Ausgleich der akustischen Manipulation. Um dies zu verhindern, muss die Kombination beider Verfahren diesen Faktor berücksichtigen. Ob und wie weit sich diese Verfahren überhaupt kombinieren lassen, muss dazu geklärt werden. Im nächsten Unterkapitel werden dazu die Hypothesen aufgestellt und in dem darauffolgenden, weshalb die HTC Vive Cosmos dafür geeignet ist.

#### 3.3.1 Verfahren

Die akustische Manipulation arbeitet iterativ und prüft zwischen zwei Durchläufen, ob sich der\*die Proband\*In zwischen dem aktuellen Iterationsschritt und dem vorherigen, abhängig von der vorherigen Orientierung  $v_0$  nach links oder rechts bewegt hat. Akkumuliert man diese Abweichung mit der bisherigen, erhält man die virtuelle Abweichung vom Pfad (siehe Kapitel 3.1.1). Diese bildet nicht die reale Abweichung ab, sondern geht davon aus, dass sich die Orientierung der Probanden immer nach dem Zentrum des Hauses richtet und damit gleichzeitig der Mitte des Pfades. Findet bei der akustischen Manipulation eine optische statt und der/die Proband\*In wird gedreht, so führt dies unmittelbar zu einem neuen Orientierungsrichtungsvektor  $v_1$ . Dies muss während der akustischen Manipulation berücksichtigt werden. Dazu wird die Rotation  $r$  als neue Variable  $n$  gespeichert und  $v_0$  und  $v_1$  werden um  $n \cdot (-1)$  rotiert. In dem Moment, in dem wieder eine optische Manipulation stattfindet, wird der neue  $r$  Wert auf den bisherigen  $n$  Wert aufsummiert. Die gespeicherte Ausgleichsvariable für die optische Manipulation ist damit die Summe aller durchgeführten Rotationen  $n \cdot (-1)$ , um den gewünschten Ausgleichseffekt zu erzielen. In der Theorie bedeutet dies, dass sich beide Verfahren mindestens ergänzend verhalten müssten. Um zu prüfen, ob die Verfahren kombinierbar sind, also sich daraus ein verbessertes, unbemerktes RDW ergibt, muss geprüft werden. Dazu stellt der Autor folgende Hypothesen auf:

- H5: Die Kombination aus dem hier genutzten ASRDW und VRDW erzielt durchschnittlich eine höhere positive Abweichung vom Zielpunkt als das Szenario ohne Manipulationen.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H5 lautet: Die Kombination aus dem hier genutzten ASRDW und VRDW erzielt durchschnittlich eine kleinere oder gleiche Abweichung vom Zielpunkt, wie das Szenario ohne Manipulationen.

- H6: Die Kombination aus dem hier genutzten ASRDW und VRDW erzielt durchschnittlich eine höhere positive Abweichung vom Zielpunkt als das reine ASRDW-Szenario.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H6 lautet: Die Kombination aus dem hier genutzten ASRDW und VRDW erzielt durchschnittlich eine kleinere oder gleiche Abweichung vom Zielpunkt, wie das reine ASRDW-Szenario.

- H7: Die Kombination aus dem hier genutzten ASRDW und VRDW erzielt durchschnittlich eine höhere positive Abweichung vom Zielpunkt als das VRDW-Szenario.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H7 lautet: Die Kombination aus dem hier genutzten ASRDW und VRDW erzielt durchschnittlich eine kleinere oder gleiche Abweichung vom Zielpunkt als das VRDW-Szenario.

- H8: Dass sich die Probanden während des Kombinations-Szenarios nicht auf den Zielpunkt gerade aus zubewegt haben, wird in den meisten Fällen von diesen nicht bemerkt.

Die Nullhypothese  $H_0$  zu H8 lautet: Dass sich die Probanden während des Kombinations-Szenarios nicht auf den Zielpunkt gerade aus zubewegt haben, wird durchschnittlich von diesen bemerkt.

Die aufgestellten Hypothesen wurden auf 8 eingegrenzt, da ein neu vorgestelltes Verfahren das Risiko birgt, sich nicht auf die Teilziele dieser Arbeit aus Kapitel 1.3 zu konzentrieren. Die Hypothesen untermauern dabei nur die angestrebte Machbarkeitsprüfung und sollen aufzeigen, dass ASRDW einzeln und in Kombination mit weiteren Verfahren funktionieren könnte. In Anbetracht dieser Ziele muss die bisher ausgewählte Hardware mit einem HMD kombiniert werden können. Dieser essenziellen Komponente widmet sich das nächste Kapitel.

### 3.3.2 HTC Vive Cosmos

Die Auswahl eines geeigneten HMDs war zur Zeit der Studie (2020) relativ stark eingegrenzt. Für einen Detektionsbereich von 20m x 10m kamen nur HMDs ohne externes Tracking und eingebauter Raumerkennung in Frage. Das benötigte Eye-Tracking musste auch integriert oder aufrüstbar sein. Die Vive Cosmos von HTC erfüllte diese Kriterien, da bei ihr das Eye-Tracking nachgerüstet werden konnte. Das HMD ist auf Abbildung 3.13 zu sehen.



Abbildung 3.14: Die Vive Cosmos von HTC, die ohne externes Tracking funktioniert.

Die Herstellerangaben sind bei dem HMD wie folgt:

- 1440 x 1700 Pixel pro Auge (2880 x 1700 Pixel kombiniert)
- Highlights: „Chaperone“-Technologie, 3-D-Audio
- Aktualisierungsrate: 90Hz
- Sichtfeld: Maximal 110 Grad
- Audio: Stereokopfhörer
- Anschlüsse: USB-C 3.0, DisplayPort (DP) 1.2, proprietärer Anschluss für Faceplates
- Sensoren: Beschleunigungssensor, Gyroskop, Pupillenabstand-Komferteinstellung (IPD)
- Anforderungen an den Tracking-Bereich: Sitzend/Stehend: Keine Mindestraumanforderungen
- Room-Scale: Raummaßstab beträgt Minimum 2 x 1,5 Meter

(*VIVE Cosmos - Technische Daten | VIVE™ 10.10.2020*)

Zur Vereinfachung wird der Name des HMDs ab diesem Kapitel auf Cosmos gekürzt. Es bot zu dem Zeitpunkt der Studie State of the Art Spezifikationen und ermöglicht nach Herstellerangaben einen unbegrenzt großen

Tracking-Bereich. Das 3D Audio kommt in dieser Arbeit nicht zum Einsatz, da Kopfhörer genutzt wurden, die den Umgebungsklang möglichst ausblenden sollten.

Damit das Ende des realen Spielbereiches auch in VR sichtbar ist, blendet die Cosmos ein dreidimensionales Grid ein, sobald man sich diesem nähert. Dies nennt HTC „Chaperone-Technologie“ (vgl. Hartmann et al., 2019, S. 1). Um diesen Spielbereich einzugrenzen, bietet HTC eine initiale Konfiguration, bei der die VR-Brille getragen werden muss. Bei dieser muss der\*die Nutzer\*In den Spielbereich mittels Pointer, auf den von der Raumerkennung identifizierten Boden zeichnen, bis dies einen Kreis ergibt. Voraussetzung für die eingebaute Raumerkennung ist ein ausgeleuchteter Raum. Bei schlechten Lichtverhältnissen führt diese zu ruckartigen Kamera-Bewegungen in der VR-Umgebung, da die verbauten Sensoren die physikalische Position des HMDs dann teilweise nicht mehr korrekt interpretieren können.

Die Controller der Cosmos wurden für dieses Experiment nur für die Kalibrierung der Raumerkennung benötigt und fanden danach keine weitere Anwendung. Die 3D-Engine die für die Implementation der Szenarien genutzt wurde, ist Unity-3D. Mit dem Steam-VR-Plugin bietet die Engine vollen Support für die Cosmos. Dabei wurden für die Szenarien fertige Assets aus dem Store verwendet, sowie das Pupil-Labs-Plugin und ein Plugin für die COM3-Schnittstelle für die Kommunikation mit dem Step Detector. Der für die VR-Szenarien geschriebene Code ist ausschließlich in C# und wurde mit der Visual Studio 2019 IDE geschrieben, die in Unity verwendet werden kann.

Nach der Vorstellung der Spezifikationen der Cosmos, schließt dieses Kapitel mit der theoretischen Basis dieser Arbeit ab. Für den praktischen Teil dieser Arbeit und der späteren Evaluation wird dem\*der Leser\*In empfohlen, die hierin vorgestellten RDW-Verfahren wiederholt zu lesen, falls der Aufbau des Experimentes sich nicht daraus erschließen sollte.

## EXPERIMENT

---

Im Rahmen dieses Experimentes werden die zuvor aufgestellten Hypothesen geprüft. Neben der empirischen Forschung, in der quantitative Daten aus den bisher vorgestellten Szenarien erhoben werden, ist diese auch zum Teil explorativ, um das hier präsentierte ASRDW zu bewerten. Dabei muss die Forschungsfrage geklärt werden, ob ASRDW überhaupt funktioniert und inwieweit dies von den Probanden vertragen und angenommen wird. Dazu haben 20 Probanden an einem Versuch mit Within-Subject-Design teilgenommen. Sie durchliefen dabei randomisiert das Referenzszenario und ASRDW-Szenario aus Kapitel 3.1.1, das Blinking-Szenario aus Kapitel 3.2.1 und das Kombinationsszenario aus Kapitel 3.3.1. Um eine höchstmögliche Objektivität zu gewährleisten, werden in diesem Kapitel die identifizierten Risiken und Lösungen dazu beschrieben. Beim Aufbau wird im Detail auf verwendetes Material eingegangen und auch auf die dabei gemessenen Laborbedingungen. Die ausgewählten Szenarien werden im Detail betrachtet und es wird auf die identifizierten Variablen eingegangen. In der Durchführung wird die angewendete Methodik beschrieben und der Versuchsablauf vorgestellt. In der Beobachtung werden die dabei erhobenen Daten präsentiert. Inwieweit die Ergebnisse die Forschungsfragen beantworten können, muss in der Diskussion geprüft werden. Die erste Antwort auf die Frage, ob das Experiment überhaupt mit der gewählten Hardware realisierbar ist, wurde dazu im folgenden Kapitel geprüft.

### 4.1 VORSTUDIE

Die Vorstudie wurde mit einer Versuchsperson durchgeführt. Es wurde zuerst geprüft inwieweit die Raumerkennung der Cosmos auch größere Areale von über 15m Raumlänge unterstützt. Dazu wurde die Turnhalle einer Grundschule genutzt, die räumlich einen Trackingbereich von 10m x 18m ermöglichte. In dieser wurde getestet, ob die gelaufene virtuelle Strecke der real gelaufenen Strecke entsprochen hat. Nachdem gesichert war, dass die internen Tracker der Cosmos größere Spielbereiche unterstützen, wurde eine größere Halle angefragt. Für den Fall, dass diese zu groß für die Raumerkennung der Cosmos gewesen wäre, hätte das Experiment auch in dem kleineren Bereich durchgeführt werden können.

Die große Zweifachturnhalle hätte einen Spielbereich von über 30m x 20m geboten. Der Tracking Bereich wurde dennoch bei 10m x 20m beibehalten, da die initiale Kalibrierung des Spielbereiches bei zunehmender Größe ungenauer wurde. Nachdem die Raumerkennung auch für die größere Halle funktionierte, wurden die verschiedenen Verfahren getestet.

Beim Test der Verfahren stellte sich heraus, dass trotz des gleichen physi-



schen Startpunktes die Probanden stark abwichen, selbst im Referenzszenario. Dies hing mit der Perspektive der Cosmos beim Start der Simulation zusammen. Da beim Start der Simulation die virtuelle Perspektive immer gleich sein musste, eignete es sich nicht, diese von der Perspektive der Probanden aus einzustellen. Bei einem Abstand von 20 Metern zum Zielpunkt, müsste der/die Probandin nur 2,86 Grad nach links oder rechts gucken, was eine Abweichung von  $\pm 1m$  zum Zielpunkt ergeben würde. Bei den Tests kamen dabei für jedes Szenario willkürliche Abweichungen mit zum Teil über 5 Metern vor. Um dies zu verhindern, musste das HMD bei jedem Startpunkt die exakt gleiche Ausrichtung haben, nach der die virtuelle Umgebung initialisiert wurde. Dazu wurde das HMD auf einer karierten Unterlage mittels Lasermessung immer gleich ausgerichtet. Dies ist perspektivisch in der nächsten Abbildung 4.1 zu sehen. Die Tests nach dieser Kalibrierung verlie-



Abbildung 4.1: Das Setup bei der Kalibrierung (im linken Part) und der Laserpunkt beim Ausrichten der Cosmos (im rechten Part).

fen im Referenzszenario mit maximalen Abweichungen von 50 Zentimetern, wobei diese auch in einem Ungenauigkeitsbereich lagen, die das HMD zum Teil in der virtuellen Umgebung gemessen hat. Schwankungen der Messgenauigkeit wurden auch bei unterschiedlichen Tageszeiten beobachtet. Dies wurde auf die Unterschiede der Lichtverhältnisse zurückgeführt. Die Halle war zwar beleuchtet, dennoch änderte sich mit der Tageszeit die Umge-

bungsbeleuchtung, weshalb der Beginn der Durchläufe möglichst früh stattfand. Aufgrund dieser Störfaktoren wurde die interne Messung des HMDs für die eigentliche Messung der Abweichung vom Zielpunkt nur sekundär verwendet.

Wie im Kapitel 3.1.2 erwähnt, fielen Sensoren durch vorher nicht beachtete Fehler im Design aus. Dabei kam es zu einem Defekt von 7 Sensoren, die teilweise durch die Beanspruchung rissen. Nachdem diese mit Kunststoff verstärkt wurden, mussten sie nicht mehr ausgetauscht werden.

Das eigentliche ASRDW wurde nach der erfolgreichen Machbarkeitsprüfung in der Vorstudie angepasst. Es wurde dabei das Risiko identifiziert, das die Schrittgeräusche von Matsch und Kies nicht klar genug differenzierbar waren, weshalb das Matsch-Geräusch gegen ein Geräusch getauscht wurde, das wie ein Tritt in eine Wasserpfütze klingt. Nachdem die Machbarkeitsprüfung erfolgreich war, wurden die Probanden angeworben.

## 4.2 PROBANDEN

Bei der Auswahl der Probanden wurde auf eine möglichst hohe Varianz im Alter geachtet, wodurch Altersgruppen zwischen 14 bis 55 Jahren vertreten sind. Die Geschlechter der Teilnehmer sind männlich und weiblich. Das Verhältnis liegt bei 35% Frauen zu 65% Männer. Die Anzahl der Teilnehmer lag ursprünglich bei 22, wobei zwei aussortiert werden mussten und somit die später aufgeführte Auswertung von 20 Proband\*Innen entspricht. Die Messfehler waren in einem dieser Sonderfälle durch die Fehlkalibrierung der VR-Brille entstanden und in einem anderen Fall wurden fälschliche Angaben zu einer signifikanten Sehschwäche gegeben, die im Vorhinein zu einer Untauglichkeit des/der Proband\*In geführt hätte. Die Probanden\*Innen wurden nicht an der Universität angeworben und haben keine Kenntnis zu dem Inhalt des Experimentes. Den Probanden wurde es untersagt nach dem Durchlauf ihre Erkenntnisse zu teilen, bis das gesamte Experiment vorbei war. Mit 60% hatte die Mehrheit der Probanden keine Erfahrung mit Virtual Reality. Die Probanden tendierten durchschnittlich zu der mehrmaligen Nutzung von Videospiele pro Monat. 12 der Probanden waren Brillenträger und 3 mussten diese tragen, um scharf in VR sehen zu können.

## 4.3 AUFBAU

Beim Aufbau dieses Versuches ist besonders die Größe des Raumes ein Kriterium für die Auswahl der Materialien. Die Szenarien werden in diesem Kapitel genauer erläutert und bestimmen den Aufbau der virtuellen Umgebung. Die Variablen beschreiben abhängige und unabhängige Faktoren, die im Versuchsaufbau und der Durchführung beachtet werden müssen.

### 4.3.1 Umgebung

In diesem Experiment wurde eine Zweifachturnhalle mit genormten 30x20m großem Spielfeld, als Versuchsumgebung genutzt. Diese ist auf der Abbildung 4.2 zu sehen. Die Halle ist ausgestattet mit Deckenlampen, die aus-



Abbildung 4.2: Die Halle als Panoramaaufnahme

reichten, um die Umgebung gleichmäßig und hell genug für die Raumerkennung der Cosmos auszuleuchten. Die Deckenfenster ließen einen hohen Anteil an Tageslicht in den Raum, was beim Voranschreiten der Tageszeit zu Beeinträchtigungen der Raumerkennung führte. Dies äußerte sich durch Framedrops in der virtuellen Umgebung. Der Hallenboden war eben, bestand aus PVC und dämmte damit Schrittgeräusche. Die Temperaturen lagen im August zwischen 29-39 Grad Celsius. Es befanden sich Sitzmöglichkeiten für die Probanden in Vorräumen, in denen der Versuchsbereich nicht einsehbar war. Die Loge ermöglichte eine erhöhte Positionierung der Kameras, um größere Bereiche des Spielfeldes mit diesen zu erfassen. In der Halle wurden neongelbe Marker in 2 Meter Abständen platziert, um Orientierungspunkte bei den Videoaufzeichnungen zu erhalten. Für die Kalibrierung der VR-Brille und die Ausrüstung der Probanden wurden Sitzblöcke bereitgestellt. Durch die räumliche Umgebung konnten die Auflagen, in der zu dieser Zeit

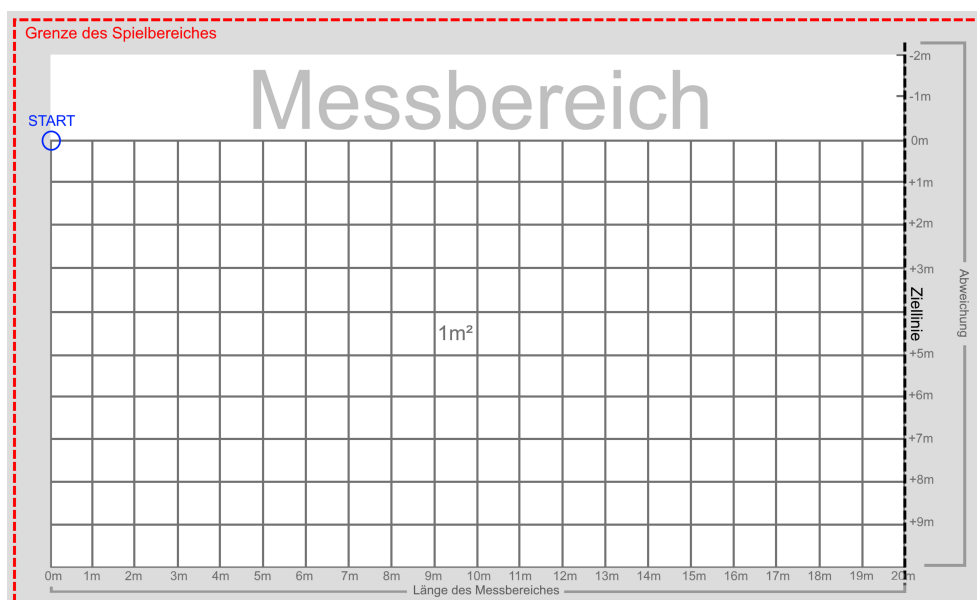


Abbildung 4.3: Die Aufteilung des Messbereiches.

herrschenden Corona-Pandemie, erfüllt werden. Die Probanden hatten dabei zwischen den Durchläufen einen ausreichenden zeitlichen sowie räumlichen Abstand zueinander. Die Aufteilung des Messbereiches wird in der Abbildung 4.3 abstrahiert dargestellt.

#### 4.3.2 *Material*

Zur optischen Messung des Ablaufes während des Experimentes, wurden Smartphone-Kameras auf Stativen verwendet. Die dabei genutzten Geräte waren ein iPhone XR, ein Samsung Galaxy S10 und ein One Plus 7. Es wurde ein Lasermessgerät mit 50m Reichweite verwendet mit positiver oder negativer Messabweichung von 1cm auf 50m, um die VR-Brille initial mit minimaler Variation ausrichten zu können. Zur Desinfektion kam Sterilium zum Einsatz, dass durch das enthaltene Propan auch für die Elektronik mitgenutzt werden konnte. Zusätzlich wurde das HMD mit einem UV-Sterilisator sterilisiert und es wurden für die Probanden passende Gesichtsmasken bereitgestellt.

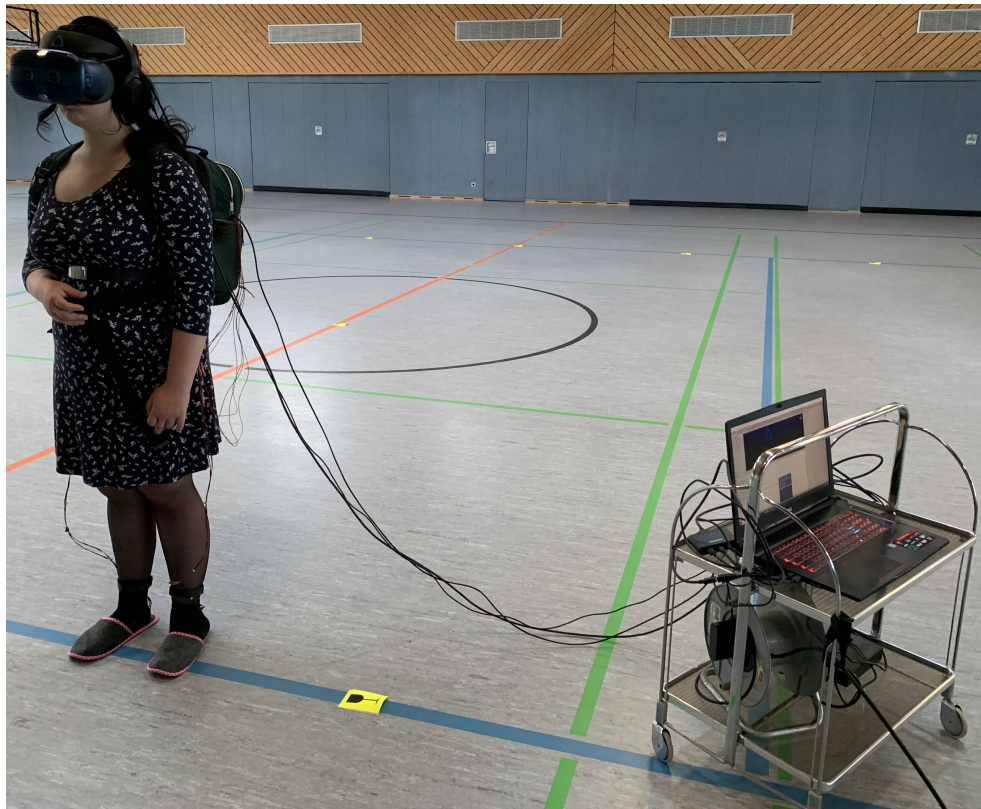


Abbildung 4.4: Eine Probadin mit der verwendeten Hardware.

Das für die Cosmos verwendete System war ein MSI GE73VR 7RF Raider Laptop mit folgenden Komponenten:

- Arbeitsspeicher: 16GB (2x 8 GB SO-DIMM DDR4-2400) RAM
- Grafikkarte: Nvidia GeForce GTX 1070 mit 8-GB-GDDR5-Video-RAM
- Prozessor: Intel Core i7-7700HQ (4 x 2.8 - 3.8 GHz, Kaby Lake)
- Speicher: 1TB Samsung 960 Evo SSD (M.2 2280, PCIe 3.0 x4 NVMe / V-NAND / Samsung Polaris / 3200 MB/s read, 1900 MB/s write / 300K IOPS / 1.5Mh MTBF / 256-Bit-AES)
- Betriebssystem: Windows 10 Education (Version: 2004)

Die Cosmos wurde an den Laptop an den Mini DisplayPort mit einem Adapter angeschlossen. Für das Pupil Labs Eye Tracking wurde ein 3m langes USB-Type-C-Kabel verwendet, für den Step-Detector ein 3m langes USB-A auf USB-B Kabel. Der Laptop wurde auf einem Servierwagen platziert. Dieser wurde hinter den Probanden beim Durchlauf geschoben und verursachte durch die ca. 43 Dezibel (bei einem Meter Entfernung) lauten Rollen keine Geräusche, die von den Probanden gehört werden konnten. Der Step-Detector wurde wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben an den Probanden montiert, mitsamt der Sohlen die für die Schuhgrößen 37-48 zugeschnitten wurden. Zu den 4 Drucksensoren des Step-Detectors wurden 12 Ersatzsensoren vorbereitet, um bei unerwarteten Defekten das Experiment nicht abbrechen zu müssen. Die Hardware (bis auf die Smartphones) für einen Durchlauf ist auf der Abbildung 4.4 zu sehen. Die verwendeten Kopfhörer waren geschlossene Sony WH-1000XM3 Kopfhörer (Sony, 18.10.2020) die mittels Kopfhörerkabel an den Kopfhörereingang der Cosmos angeschlossen wurden.

### 4.3.3 Szenarien

Bei den Szenarien stehen die Unterschiede in der virtuellen Umgebung im Fokus. In dieser Arbeit wurde ein Szenario ohne Manipulationen genutzt, um einen Referenzdurchlauf zu erhalten. Dabei wurden auch bei realer Abweichung vom Weg dieselben Schrittgeräusche des\*der Probanden\*In eingeblendet, wodurch keine akustische Abweichung vom ausgeblendeten Pfad möglich war. Wären hierbei die Ränder des Weges berücksichtigt und das Wassergeräusch abgespielt worden, im Falle das der\*die Proband\*In den Weg verlässt, wäre dies bereits eine mögliche Einwirkung oder Manipulation gewesen. Dies wurde bewusst verhindert, um mögliche andere Faktoren, die zu einer Abweichung der Probanden\*Innen vom Weg führen könnten, während dieses Durchlaufes erkennen und spätestens in der Evaluation ausschließen zu können. Das Ergebnis des Referenzdurchlaufes wurde nicht genutzt, um nutzerspezifische Abweichungsmuster zu identifizieren und diese bei der Auswertung der Daten zu berücksichtigen oder wie bei Feigl die Abweichungen in den anderen Szenarien damit zu normalisieren (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2). Mit dieser Vorgehensweise wäre dies zum einen kein randomisierter Ablauf mehr gewesen und zum anderen hätte ein möglicher Lerneffekt nach diesem initialen Durchlauf nicht mehr ausgeschlossen werden können. Die gleichen akustischen Bedingungen galten für das rein visuelle Szenario, das in Kapitel 3.2.1 vorgestellt wurde. Die Möglichkeit akustisch vom Weg abzuweichen, hätte dabei ebenfalls die visuelle Manipulation beeinflussen können. Das Szenario mit rein akustischer Manipulation, aus Kapitel 3.1.1, bei dem der\*die Proband\*In das Wassergeräusch hörte, war hinsichtlich der eingesetzten Soundquellen äquivalent zu dem Szenario mit akustischer und visueller Manipulation aus Kapitel 3.3.1.



Abbildung 4.5: Die initiale Perspektive in der virtuellen Umgebung (Weg eingeblendet)

Die virtuelle Kulisse wurde für alle vier Szenarien gleich aufgebaut. Die Lichtquellen und Schatten waren in der Umgebung statisch und es wurden keine besonders hochauflösenden Texturen oder rechenintensive Effekte verwendet, um konstant möglichst hohe FPS-Werte zu gewährleisten. Diese lagen dadurch in den meisten Fällen bei über 120 FPS. In der Abbildung 4.5 ist die Szene aus der initialen Perspektive des\*der Probanden\*In zu sehen. Bei dieser ist der Kiesweg mit seinen Wasserrändern noch eingeblendet. Diese werden, sobald das Szenario starten kann, wieder ausgeblendet. Das Haus mit dem semi-transparenten Objekt davor, blieb dabei das ganze Szenario lang eingeblendet. Das Objekt vor dem Haus wurde dabei als Lichtquelle beschrieben und während des Durchlaufes von den Probanden\*Innen passiert. Das Ausblenden des Weges wurde als nächtlicher Spaziergang beschrieben und dementsprechend war in jedem Szenario ein Sternenhimmel sichtbar. Nachdem der Weg ausgeblendet wurde, sah die Kulisse wie in Abbildung

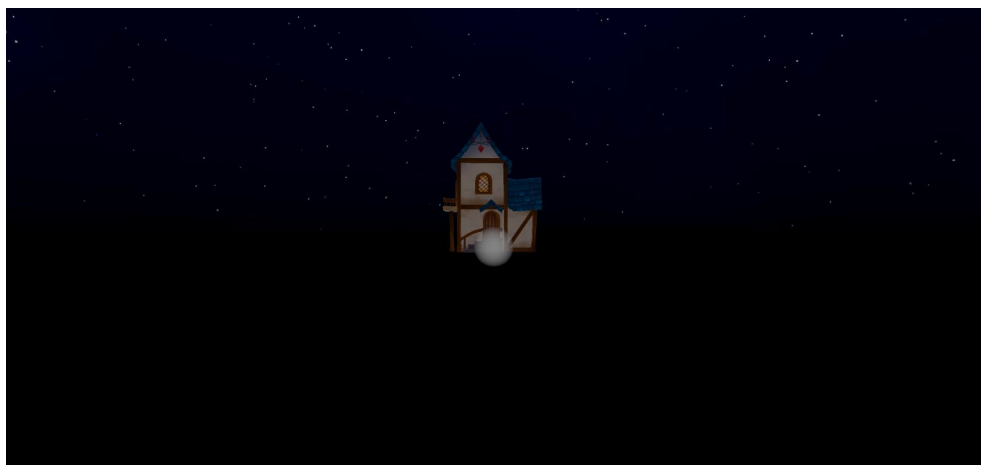


Abbildung 4.6: Die initiale Perspektive in der virtuellen Umgebung nach Start eines Durchlaufes (Weg ausgeblendet).

4.6 aus. Sobald die Probanden\*Innen auf das Haus zugehen und nach mindestens 20 Metern die reale Ziellinie überqueren, wurde die Simulation beendet und die Kulisse war danach nicht mehr sichtbar.

Zu diesen Szenarien und den dazu verwendeten Verfahren ergaben sich die zu betrachtenden Variablen, die im nächsten Kapitel genauer beschrieben werden.

#### 4.3.4 Variablen

Die unabhängigen Variablen, die im Fokus dieser Arbeit stehen, sind die Manipulationen, die während eines Durchlaufes angewendet werden. Zu diesen gehört die eingestellte Stärke der Rotationen in Grad, im Falle das die Probanden\*Innen blinzeln aus Kapitel 2.3 (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 1). Diese hat Einfluss auf die Abweichung der Probanden\*Innen bis zur Ziellinie. Die Abweichung bis zur Ziellinie ist dementsprechend die abhängige Variable. Wird die Summe der Blinzler mit der Stärke der Rotation multipliziert, er-

gibt dies den Gesamtwinkel, mit dem ein\*e Proband\*In gedreht worden ist. Aus diesem lässt sich nicht direkt bestimmen, wie hoch die Abweichung ausfällt. Hierzu muss die Entfernung zur Zielgeraden beachtet werden, in der eine Manipulation stattgefunden hat, da ein veränderter Winkel zu Beginn eines Durchlaufes eine höhere Abweichung bewirkt als im späteren Verlauf. Die Entfernung vom Start- bis zum Zielpunkt und die damit verbundene Dauer des Durchlaufes, beeinflussen die mögliche Anzahl der Blinzler pro Szenario.

Die Abweichung ist bei der akustischen Manipulation abhängig von der eingestellten Stärke der Abweichung vom Weg pro Meter und der Länge der Strecke. Diese eingestellte Abweichungsstärke wird multipliziert mit dem Ergebnis der Ausblendfunktion. Dieses Ergebnis ist abhängig von der Entfernung bis zum Ziel. Die zirka letzten 5 Meter bis zum Zielpunkt dienen daher hauptsächlich dem Ausblenden der akustischen Manipulation. In diesem Experiment ist dieser Ausblendbereich zirka 25% der zu laufenden Entfernung. Bei kürzeren Strecken würde die genannte Funktion somit noch stärker ins Gewicht fallen. Die Entfernung bis zum Zielpunkt ist bei einem akustischen Szenario daher eine zu betrachtende unabhängige Variable.

Zusammengefasst ist die gemessene Abweichung abhängig von den verwendeten Verfahren und deren Variablen. Diese sind abhängig von der Dauer eines Durchlaufes und der Strecke. Als Störvariablen wurden hierbei die eigenen Schrittgeräusche identifiziert, da diese die künstlichen Schrittgeräusche überblenden könnten, sowie andere externe Geräuschquellen aufgrund derselben Problematik (vgl. Razzaque, Kohn und Whitton, 2001, S. 105-108). Weitere Störfaktoren sind Fehler bei der Pupillen Detektion beim Eye Tracking und nicht korrekt erkannte Schritte. Eine ungenaue Kalibrierung der initialen Perspektive zu Beginn der Simulation wäre dabei eine der signifikantesten Störvariablen, da sie unweigerlich zu einem verfälschten Ergebnis führen würde.

Abschließend ist zu erwähnen, dass das Vorwissen über den Ablauf des Experimentes ein wichtiger Faktor ist, der schon in vorherigen Arbeiten identifiziert wurde (vgl. Meyer, Nogalski und Fohl, 2016, S. 23). Dieser wurde im Experiment berücksichtigt, indem die Proban\*Innen nicht über die Ziele des Experimentes informiert wurden.

#### 4.4 DURCHFÜHRUNG

Bei der Durchführung des Experimentes wird der konkrete Ablauf näher erläutert. Hierbei steht die jeweils gewählte Form der Messung mittels Fragebögen im Vordergrund und die gewählte Struktur des Ablaufes. Dieses Kapitel ergänzt außerdem den vorher beschriebenen Aufbau mit den Details, die bei der Praxis beachtet worden sind.



## 4.4.1 Fragebögen

Die verwendete Art der Fragebögen in diesem Experiment sowie deren Reihenfolge, wie diese bei jedem Durchlauf verwendet worden sind, sind von dem Kapitel 2.2 beschriebenen Experiment von Steinicke und Langbehn inspiriert (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 5).

Ihre Identifikationsnummer: \_\_\_\_\_

### Fragebogen: Sehen, Laufen und Hören in Virtual Reality

Liebe Teilnehmerin, lieber Teilnehmer,

Sie werden im Laufe dieses Experimentes ein Virtual Reality Headset, Kopfhörer sowie spezielle Schuhsohlen tragen und damit laufen. Ihre Daten werden anonymisiert ausgewertet und dienen zur Untersuchung Ihrer physischen Reaktion auf die virtuelle Umgebung. Dieser Fragebogen dient außerdem dazu ungewollte körperliche Reaktionen, wie Unwohlsein oder Probleme bei der Ausführung des Experimentes, im Vorfeld zu vermeiden.

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme!**

1. **Wie alt sind Sie?** \_\_\_ Jahre
2. **Welches ist Ihr Geschlecht?**  männlich  weiblich  divers
3. **Spielen Sie Videospiele?**  
 Nie  Unregelmäßig  Mehrmals im Monat  Täglich
4. **Interessieren Sie sich für Technik?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
5. **Haben Sie Erfahrung mit Virtual Reality?**  Ja  Nein
  - 5.1. Wenn ja, hatten Sie dabei Symptome wie Schwindel oder sonstiges Unwohlsein?  Ja  Nein
  - 5.2. Wenn ja, wie häufig nutzen Sie Virtual Reality Anwendungen?  
 Nie  Unregelmäßig  Mehrmals im Monat  Täglich
6. **Haben Sie Probleme mit Ihrem Sehvermögen?**  Ja  Nein
  - 6.1. Wenn ja, können Sie diese durch eine Brille oder Kontaktlinsen kompensieren?  Ja  Nein
  - 6.2. Haben sie Probleme mit 3D Filmen oder Tiefenwahrnehmung?  Ja  Nein
  - 6.3. Sind Sie kurzsichtig?  Ja  Nein
  - 6.4. Sind Sie weitsichtig?  Ja  Nein
  - 6.5. Werden Sie Ihre Sehhilfe bei dem Experiment verwenden?  Ja  Nein
  - 6.6. Anderes: \_\_\_\_\_
7. **Haben Sie Epilepsie?**  Ja  Nein
8. **Haben Sie Probleme mit Ihrem Hörvermögen?**  Ja  Nein
  - 8.1. Wenn ja, können Sie diese durch den Einsatz von Hörgeräten kompensieren?  Ja  Nein
  - 8.2. Sind sie auf einem oder beiden Ohren taub?  Ja  Nein
  - 8.3. Werden Sie das Hörgerät bei dem Experiment verwenden?  Ja  Nein
  - 8.4. Anderes: \_\_\_\_\_

Abbildung 4.7: Der Vorabfragebogen ohne Einwilligungserklärung

Zu Beginn des Experimentes sollte festgestellt werden, ob die Probanden\*Innen in der Lage waren das Experiment durchzuführen und ob sie Einschränkungen beim Hören oder Sehen aufwiesen. Sie wurden außerdem gefragt in-

wieweit sie Erfahrung mit Videospielen und VR haben (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 5). Dazu wurde ein Vorabfragebogen entwickelt, der auf der Abbildung 4.7 zu sehen ist. Der Titel „Sehen, Laufen und Hören in Virtual Reality“ und eine kurze Einleitung zum Ablauf des Experimentes, gaben den Probanden\*Innen keine Auskunft über die Ziele dieser Arbeit. Der Aufbau der Fragen wird folglich kurz erläutert:

- In der 1. Frage wurde das Alter der Probanden\*Innen erfragt, um in der Auswertung gegebenenfalls feststellen zu können, ob die Ergebnisse in verschiedenen Altersgruppen variieren.
- Bei der 2. Frage wurde das Geschlecht erfragt, da bei ARDW schon in vorherigen Experimenten Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden\*Innen festgestellt worden sind (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2).
- Die 3. Frage sollte in Erfahrung bringen, ob sich unter den Probanden\*Innen Gamer befinden, da bereits in der Vergangenheit festgestellt wurde, dass Gamer Rotationen beim Blinzeln nicht eher bemerken als Nicht-Gamer (vgl. Nguyen und Kunz, 2018, S. 5). Sollte dies in diesem Experiment gleich oder anders sein, wäre dies ein erwähnenswertes Ergebnis. Dazu wurden bewusst 4 Items gewählt, um Probanden\*Innen klar als Gamer identifizieren zu können, im Falle, dass sie „täglich“ antworten. Das gegenteilige Extrem hierzu war „Nie“. Die Antworten „Unregelmäßig“ und „Mehrere Male im Monat“ dienten nur um eine Tendenz ermitteln zu können.
- Die 4. Frage ergründet sich aus dem Motivationsaspekt, weshalb die Probanden\*Innen an der Studie teilnehmen. Im Gegensatz zu Probanden\*Innen im eigenen Fachbereich, gibt es möglicherweise keinen oder einen Zusammenhang mit deren generellem Interesse für den technischen Bereich. Da die Probanden\*Innen nicht an der Universität angeworben worden sind, könnte dies für die Anwerbung bei späteren Arbeiten relevant sein. Hierbei wurde eine klassische Likert-Skala mit einem neutralen Item verwendet, um auch den Fall zu betrachten, dass es keine klare Tendenz geben könnte.
- Bei der 5. Frage wurde erfragt, ob die Probanden\*Innen bereits Erfahrung mit VR haben. Zur Vereinfachung des Ausfüllens, konnten die dazu gestellten Fragen bei Verneinung übersprungen werden. Die Frage 5.1 sollte dabei prüfen, ob die Probanden\*Innen in ihrem Leben bereits Krankheitssymptome in Zusammenhang mit VR erlebt haben. Wäre dies bejaht worden, wären die Probanden\*Innen individuell befragt worden, inwieweit diese Symptome ausgeprägt waren, um unerwünschte Reaktionen im Vorhinein zu verhindern. In der Frage 5.2 wurden die Antworten wie in der 3. Frage gewählt, um Probanden\*Innen zu identifizieren bei denen VR-Anwendungen zum Alltag gehören.

- Bei der 6. Frage ging es wie bei einer Anamnese darum zu ermitteln, ob die Probanden\*Innen beim Sehen eingeschränkt sind. Da hierbei jedoch keine medizinischen Individualitäten ergründet werden sollten sondern lediglich, ob die Probanden\*Innen für den Versuch tauglich waren, gab es dazu einfache Ja-/Nein-Fragen. Bei 6.1 sollte festgestellt werden, ob die Probanden\*Innen diese Einschränkung überhaupt kompensieren können. Wäre dies nicht möglich gewesen, hätte dies individuell erfragt werden müssen. Die zweite Frage diente zur Prüfung, ob die räumliche Wahrnehmung der Probanden\*Innen eingeschränkt ist, um dazu gegebenenfalls Besonderheiten aufzunehmen und bei der Auswertung berücksichtigen zu können. Dieser Aspekt galt genauso für die Fragen 6.3 und 6.4. Bei der Frage 6.5 wurde explizit gefragt, ob die Probanden\*Innen die Sehhilfe tragen, falls es hierbei zu Problemen mit dem Eye-Tracker kommen sollte oder die Probanden\*Innen ihre Sehschwäche nicht kompensieren, obwohl sie es könnten. Die optionale Frage 6.6 war für den Fall, dass die Probanden\*Innen einen Sonderfall erwähnen, der in dieser Arbeit nicht berücksichtigt worden ist.
- Die 7. Frage sollte ein gesundheitliches Risiko für Epileptiker ausschließen.
- Die 8. Frage sollte prüfen, ob die Probanden\*Innen in ihrem Hörvermögen eingeschränkt sind. Analog zu den Unterfragen bei der 6. Frage, werden hier grundlegende Einschränkungen erfragt, ob diese kompensiert werden und inwieweit die Probanden\*Innen in diesem Falle noch tauglich für den Versuch sind. Dies wird erfragt, um die Erkenntnisse daraus in der Auswertung gegebenenfalls berücksichtigen zu können oder nicht betrachtete Sonderfälle identifizieren zu können.

Dieser Fragebogen wurde mitsamt einer Einwilligungserklärung überreicht, um die erhobenen Daten aufzeichnen und verwenden zu dürfen. Dabei wurde Wert auf Datenschutz gelegt und den Probanden\*Innen die Möglichkeit aufgezeigt in jedem Moment das Experiment abbrechen zu dürfen.

In dem Experiment dieser Bachelorarbeit wurde, wie bei Steinicke und Langbehn, vor und nach den Durchläufen eines\*r Probanden\*In der SSQ ausgefüllt (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 5). Das in VR-Simulationen vor und nach dem Experiment ein SSQ ausgefüllt wird, wird empfohlen damit der Unterschied zwischen den bereits bestehenden und entstandenen Symptomen gemessen und berücksichtigt werden kann (vgl. Bimberg, Weissker und Kulik, 2020, S.466). Bei diesen Symptomen handelt es sich um durch Simulatoren verursachte Krankheitssymptome, die mit dem SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) standardisiert und kategorisch erfragt werden können, wodurch bewertet werden kann, wie gesundheitlich verträglich die verwendete Simulation ist (vgl. Kennedy et al., 1993, S. 203-220). In dieser Arbeit wurde dieser Fragebogen mit deutscher Übersetzung verwendet. Der Grund warum Krankheitssymptome in diesem Experiment zu erwarten sind, ist vor allem das Blinking- und Kombinationsszenario. In diesen Szenarien werden

die Probanden\*Innen rotiert, was die Häufigkeit dieser Symptome verstärkt (vgl. Lo und So, 2001, S. 12).

Um festzustellen, ob die Probanden\*Innen die Manipulationen in den Szenarien bemerkt haben, gab es einen Fragebogen, der zwischen den Durchläufen ausgefüllt wurde. Im Gegensatz zu den Studien die die DTS von bestimmten RDW-Verfahren gemessen haben, bei denen direkt gefragt wurde, in welche Richtung die Proband\*Innen sich zum Beispiel mehr oder weniger gedreht haben, wurde hierbei nicht verraten, dass überhaupt eine Manipulation stattgefunden hat, damit sich die Probanden\*Innen nicht darauf konzentrierten (vgl. Nguyen und Kunz, 2018, S. 3). Deswegen wurde der Fragebogen, der auf Abbildung 4.8 zu sehen ist, nicht von dem Probanden\*Innen selbst ausgefüllt, sondern vom Autor dieser Arbeit. Dieser Fragebogen besteht aus vier Blöcken, die für jedes Szenario einzeln ausgefüllt wurden.

Fragebogen zur Evaluation (Nach jedem Szenario)	Identifikationsnummer: _____
1. Konnten Sie zu jeder Zeit das Zielobjekt identifizieren? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]      Szenario: 2. Konnten Sie sich immer gerade auf das Zielobjekt zubewegen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ] Nicht sicher[ <input type="checkbox"/> ] 3. Ist Ihnen sonst noch etwas aufgefallen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]	
Wenn ja, was? _____ _____ _____	
Op.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt) Ak.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt)	
1. Konnten Sie zu jeder Zeit das Zielobjekt identifizieren? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]      Szenario: 2. Konnten Sie sich immer gerade auf das Zielobjekt zubewegen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ] Nicht sicher[ <input type="checkbox"/> ] 3. Ist Ihnen sonst noch etwas aufgefallen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]	
Wenn ja, was? _____ _____ _____	
Op.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt) Ak.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt)	
1. Konnten Sie zu jeder Zeit das Zielobjekt identifizieren? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]      Szenario: 2. Konnten Sie sich immer gerade auf das Zielobjekt zubewegen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ] Nicht sicher[ <input type="checkbox"/> ] 3. Ist Ihnen sonst noch etwas aufgefallen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]	
Wenn ja, was? _____ _____ _____	
Op.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt) Ak.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt)	
1. Konnten Sie zu jeder Zeit das Zielobjekt identifizieren? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]      Szenario: 2. Konnten Sie sich immer gerade auf das Zielobjekt zubewegen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ] Nicht sicher[ <input type="checkbox"/> ] 3. Ist Ihnen sonst noch etwas aufgefallen? Ja[ <input type="checkbox"/> ] Nein[ <input type="checkbox"/> ]	
Wenn ja, was? _____ _____ _____	
Op.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt) Ak.- Man. bemerkt - Wenn ja: (1 = kaum bemerkt) 1[ <input type="checkbox"/> ] 2[ <input type="checkbox"/> ] 3[ <input type="checkbox"/> ] 4[ <input type="checkbox"/> ] 5[ <input type="checkbox"/> ] (5 = deutlich bemerkt)	

Abbildung 4.8: Der Fragebogen der nach jedem Szenario verwendet wurde.

Die drei Fragen pro Block wurden dabei nach jedem durchlaufenen Szenario gleich vorgelesen. Die 1. Frage diente zur Ermittlung, ob sich die Probanden\*Innen in der Simulation orientieren konnten und das Ziel dabei fokussiert haben. Wäre dies nicht der Fall gewesen, hätte dies bedeutet, dass im Ablauf möglicherweise etwas Unerwartetes geschehen war und dieser hätte nicht bewertet werden können. Dabei wurden die Antworten nur vorgelesen, wenn die Probanden\*Innen diese nicht klar bejaht oder verneint hatten, um diese nicht zu beeinflussen. Dies war im Falle der 2. Frage wichtig, da diese mit der Antwort: „Nicht sicher“ suggerieren könnte, dass dieser Fall nicht klar war. Diese Frage wurde so formuliert, da versucht wurde herauszufinden, ob die Probanden\*Innen bemerkt haben, dass sie sich möglicherweise, durch das RDW, nicht gerade auf das Ziel zubewegt haben, sondern real einen Bogen gelaufen sind. Die dritte Frage sollte dabei generell ermitteln, ob Manipulationen bemerkt worden sind. Wurde diese Frage bejaht, konnten die Probanden\*Innen anmerken, was ihnen aufgefallen ist. In dem Falle das dabei eine Charakteristik der Manipulationen identifiziert werden sollte, wurden die Probanden\*Innen konkret gefragt, inwieweit diese Manipulation bemerkbar war. Dabei wurde eine Skala von 1-5 gewählt, um die Stärke dabei zu ermitteln. Mit diesem Zwischenfragebogen sollte damit die Frage beantwortet werden, ob und inwieweit die Manipulationen von den Probanden\*Innen bemerkt wurden.

Um im Nachhinein das Gefühl von Präsenz der Proband\*Innen in der Simulation zu messen und zu bewerten, wurde der IPQ verwendet (*igroup presence questionnaire* 15.10.2020). Dieser wird als standardisierter Fragebogen empfohlen, um die Präsenz in der VR-Simulation zu bewerten (vgl. Schwind et al., 2019, S. 10). Der IPQ wurde wie die anderen Fragebögen in Papierform ausgefüllt, da es keinen Einfluss auf das durchschnittliche Ergebnis hat, ob dieser in VR oder real ausgefüllt wird (vgl. Schwind et al., 2019, S. 10).

Um die Qualität für dieses Experiment grob bewerten zu können und inwieweit die Probanden\*Innen sich im Nachhinein bewusst waren, dass sie manipuliert worden sind, wurde ein Fragebogen für die Evaluation konstruiert. Hierbei wurde auf einen standardisierten Fragebogen verzichtet, um auf individuelle Aspekte der Simulation eingehen zu können. Dieser ist auf Abbildung 4.9 zu sehen.

Ihre Identifikationsnummer: \_\_\_\_\_

## Evaluationsfragebogen zu diesem Experiment

1. **Haben Sie die Simulation als angenehm empfunden?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
2. **Haben Sie bemerkt, dass Sie in einem der Durchläufe vom Weg abgekommen sind?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
3. **Haben Sie die Schrittgeräusche als natürlich empfunden?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
4. **Haben Sie die Schrittgeräusche als Ihre eigenen wahrgenommen?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
5. **Haben Sie bemerkt, dass sich in einem der Durchläufe Ihr Blickwinkel während des Blinzeln gedreht hat?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
6. **Waren die Anweisungen verständlich?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu
7. **Was hat Ihnen am meisten gefallen (hier sind mehrere Kreuze möglich)?**  
 Das Szenario ohne Weg  Das Szenario mit Weg  Das Virtual Reality Headset   
 Die Kopfhörer  Die eigenen Schritte in Virtual Reality zu hören
8. **Würden Sie wieder an einer Virtual Reality Studie teilnehmen?**  
 Trifft zu  Trifft eher zu  Unentschlossen  Trifft eher nicht zu  Trifft nicht zu

Abbildung 4.9: Der Fragebogen nach dem Experiment.

Die Items zu den Fragen dazu wurden, bis auf die 7. Frage, in Form der Likert-Skala gewählt, um eine neutrale Antwortmöglichkeit zu gewährleisten. Die Fragen werden in den folgenden Punkten näher erläutert:

- Die 1. Frage diente dazu die qualitative Wahrnehmung der Simulation zu bewerten. Wäre diese direkt als unangenehm bewertet worden, wäre dies ein Hinweis auf ein unpassend gewähltes Szenario oder eingesetztes Verfahren.
- Die 2. Frage sollte nicht beantworten, ob die Probanden\*Innen das Gefühl hatten gerade auf das Ziel zuzugehen, sondern ob sie dabei bemerkt haben das sie auch vom Weg abgekommen sind. Dies hätte theoretisch von allen Probanden\*Innen bejaht werden müssen, da ihnen im akustischen Szenario signalisiert wurde, dass sie ins Wasser getreten sind. Hinter dieser Frage steckt damit die Tendenz, ob die Manipulationen im Nachhinein noch ein präsender Faktor war oder nicht.
- Bei der 3. Frage wurde nochmal direkt erfragt, ob die Schrittgeräusche als natürlich wahrgenommen wurden. Damit sollte die akustische Repräsentation der eigenen Schrittgeräusche primär bewertet werden.
- Die 4. Frage sollte die Qualität des Step-Detectors bewerten, da für diesen Anwendungsfall und die Funktion der Hardware vor allem wichtig war, dass die virtuellen Schritte als die eigenen wahrgenommen wurden.
- Die 5. Frage ging konkret darauf ein das die Rotationen während des Blinzeln im Nachhinein bemerkt worden sind. Hierbei sollten die Probanden\*Innen unabhängig vom Prüfer bestätigen, ob sie die Form der Manipulation bemerkt haben.
- Die 6. Frage wurde gestellt, um die Qualität der Verständlichkeit der Anweisungen während des Experimentes zu messen.
- Die 7. Frage wurde absichtlich konstruktiv gestellt und hat ein paar Aspekte aus dem Versuch genommen, um diese für zukünftige Experimente, dieser Art, als Werbemittel hervorzuheben. Hierbei wurde erfragt, ob zum Beispiel das Szenario am Anfang mit Weg (der vor dem Start ausgeblendet wurde) oder ohne Weg interessanter war oder welche technischen Komponenten in dem Experiment interessant waren.
- Bei der 8. Frage sollte die Qualität des gesamten Experimentes bewertet werden, inwieweit die Motivation der Probanden\*Innen nach dem Experiment vorhanden war, wieder an so einem Versuch teilzunehmen.

In dem Experiment wurden damit insgesamt 6 Fragebögen und eine Einverständniserklärung pro Probanden\*In ausgefüllt. In den nächsten Kapiteln werden diese im Kontext des Ablaufes verwendet, um die Eindrücke der Teilnehmer vor, zwischen und nach der Durchführung zu erfassen.

#### 4.4.2 Vorbereitung

Vor jedem Durchlauf wurde das HMD desinfiziert und mittels UV-Strahlung sterilisiert. Die Zeitfenster zwischen den individuellen Durchläufen der Probanden wurden so vereinbart, dass ein Minimum an potenziellen zwischenmenschlichen Kontakten gewährleistet wurde. Vor Beginn des Experimentes, wurde den Proband\*innen der Vorabfragebogen, die Einverständniserklärung und der SSQ-Fragebogen überreicht. Es wurde die Schuhgröße erfragt, damit die Sohlen parallel zugeschnitten und die Drucksensoren passend platziert werden konnten. Die Reihenfolge der Szenarien wurde mit einem Zufallsgenerator ermittelt. Das HMD wurde zum Zielpunkt ausgerichtet und die virtuelle Kameraperspektive neu kalibriert. Den Proband\*innen wurden die Pantoffeln mit den Sohlen angezogen, die Kabelführung angelegt und der Rucksack für die Step Detection aufgesetzt. Das Szenario wurde wie folgt beschrieben: „Du siehst gleich ein Haus mit einem Licht davor. Du gehst gleich auf einem Kiesweg darauf zu, bis dir ein Signal zum Anhalten gegeben wird. An den Rändern des Kiesweges ist Wasser. Versuche gerade auf das Haus zuzugehen.“ Diese Einführung ist zwischen den Proband\*innen mit Variation verbunden gewesen, da den Proband\*innen gestattet war hierzu Rückfragen zu stellen und eine wortwörtliche Wiederholung nicht zwischen jedem Szenario notwendig erschien. Um festzustellen, ob die Anweisungen verständlich waren, wurde dies auch im Evaluationsfragebogen erfragt. Nach den Anweisungen wurden den Proband\*innen das HMD aufgesetzt. Jetzt wurde erfragt, ob ihnen die Umgebung scharf oder unscharf erscheint. Hierbei musste bei Bedarf für das HMD die Pupillendistanz gemessen und neu eingestellt werden. Danach wurde der\*dem Proband\*in die Kopfhörer aufgesetzt und geprüft, ob die Step Detection funktionierte. Das Szenario wurde in der Unity-Umgebung ausgewählt und das Eye Tracking kontrolliert. Die Videomessung durch die beiden Smartphones wurde danach gestartet. Der\*die Proband\*In wurde auf den Startpunkt geleitet und zum Zielpunkt hingedreht. Der Weg wurde ausgeblendet und er\*sie wird mit einem klar hörbaren Countdown angewiesen loszugehen, wenn das jeweilige Szenario in Unity gestartet wurde.

#### 4.4.3 Ablauf innerhalb der Durchführung

Nachdem Start des Szenarios ist ein\*e Proband\*in primär auf sich gestellt. Wurde die Ziellinie überquert, wurde den Proband\*innen akustisch und/oder textuell, klar verständlich signalisiert, anzuhalten. Die Messung wurde direkt beim Überqueren der Linie manuell gestoppt, wodurch gewährleistet wurde, dass die Variation des Stop-Signals und die Reaktionszeit der Proband\*innen, keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Die Videomessung wurde danach deaktiviert. Zwischen jedem Durchlauf wurde die VR-Brille kurz abgesetzt, da die Umgebungstemperaturen teilweise bei über 30 Grad lagen und dies mit der zusätzlichen Abwärme des HMDs notwendig war. Die Proband\*innen wurden zum Startpunkt zurückgeführt und durften sich



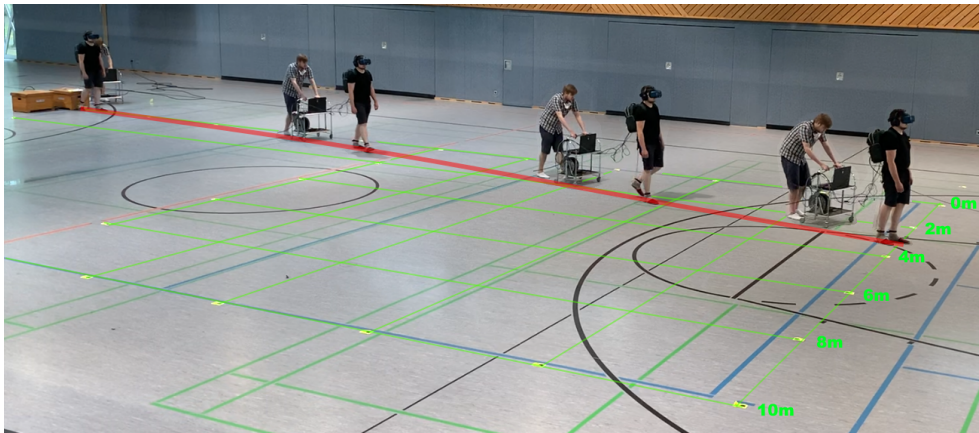


Abbildung 4.10: Ein Durchlauf illustriert mit zum Teil überlagerten Aufnahmen aus der Perspektive einer der Kameras, mit eingezeichnetem Raster des sichtbaren Messbereiches.

bei Bedarf hinsetzen. Der Fragebogen für die Evaluation während des Durchlaufes wurde verwendet, um zu erfragen, ob Manipulationen bemerkt worden sind. Dieser wurde nicht ausgehändigt, um den Proband\*innen keine Hinweise auf den Ablauf oder die eigentliche Motivation zu geben sondern es wurden die Fragen nach jedem Durchlauf vorgelesen.

#### 4.4.4 *Evaluation*

Die Evaluation bezieht sich auf den Abschluss des Experimentes unmittelbar nach den Durchläufen. Hierbei wurden nachdem die Sensoren von den Proband\*innen entfernt und den Proband\*innen zuerst der SSQ und darauf der IPQ ausgehändigt. Der eigens erstellte Evaluationsfragebogen wurde zuletzt beantwortet. Nachdem die Proband\*innen diese ausgefüllt hatten, wurde ihnen dankend eine Tüte mit Süßigkeiten als Belohnung überreicht. Diese gab es erst zum Schluss damit sie nicht das Ergebnis der Evaluation positiv beeinflussen konnte.

## 4.5 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt. Dieses gliedert sich in die Vorbefragung, Durchführung und Evaluation. Diese Bereiche entsprechen thematisch dem chronologischen Ablauf den die Teilnehmer\*innen (N=20) bei diesem Experiment durchliefen. Die in diesem Kapitel gewählten Diagramme und Tabellen zeigen nicht alle erhobenen Daten dieser Arbeit, sondern sind reduziert auf wesentliche Aspekte, die betrachtet worden sind. Die vollständig erhobenen Daten können im digitalen Anhang eingesehen werden.

## 4.5.1 Vorbefragung

Bei der Vorbefragung werden die Ergebnisse des Vorabfragebogens und des SSQ-Fragebogens vorgestellt. Sie beinhaltet damit grundlegende Informationen über die anonymisierten Proband\*innen, die in der Diskussion in Kapitel 5 wiederholt aufgegriffen werden. Die bei der Vorabbefragung erhobenen Daten werden wie folgt präsentiert:

Der Vorabfragebogen wurde vor dem Experiment ausgefüllt. Alle Teilnehmer gaben dabei an entweder männlich oder weiblich zu sein. Somit gab es keine Teilnehmer\*innen die „divers“ angaben. Das Alter der Männer lag bei  $M=29,54$  und der Frauen bei  $M=30,14$  Jahren. Das Durchschnittsalter der Proband\*innen lag somit bei  $M=29,75$  Jahren (mit  $SD=13,4$  Jahren). Der Anteil der Männer lag bei 65% und der Frauen bei 35%, dies entsprach 7 Frauen und 13 Männern. Der jüngste Proband war 14 Jahre alt und der älteste 55.

In der Abbildung 4.11 ist die Verteilung der Antworten zu sehen, die die Probanden auf die Frage geben haben, ob sie Interesse an Technik aufweisen. Zu der Abbildung ist anzumerken das die neutrale Antwort: „Unentschlossen“ nicht gewählt wurde, weshalb sie in der Abbildung nicht aufgeführt wird. An der Abbildung 4.11 ist zu sehen, dass mit 65% eine klare Mehrheit der Proband\*innen Interesse am Technikbereich aufwies. Dabei fiel auf das bei den Frauen zwei für „Trifft eher nicht zu“ und eine für „Trifft nicht zu“ gestimmt haben. Bei 7 Probandinnen sind dies 42,85% und damit annähernd die Hälfte. Im Durchschnitt ( $M=1,8$  wobei 1=„Trifft zu“ und 2=„Trifft eher zu“) haben die Proband\*Innen damit „Trifft eher zu“ geantwortet ( $SD=1,3$ ).

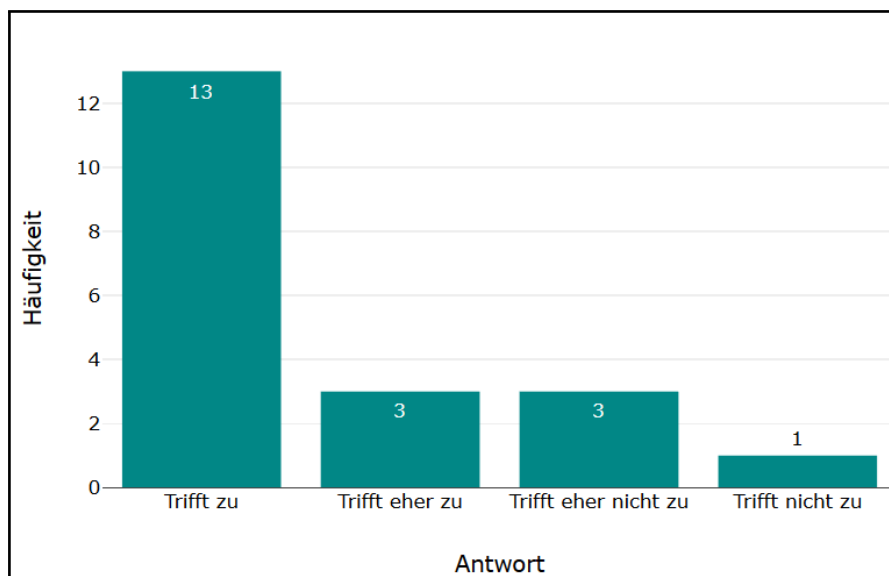


Abbildung 4.11: Die Häufigkeit der Antworten, ob die Proband\*innen an Technik interessiert sind.

In der Abbildung 4.12 ist zu sehen, wie häufig die Proband\*innen Videospiele spielen. 30% der Proband\*innen gaben an täglich Videospiele zu spielen. In dieser Gruppe mit überwiegend männlichen Probanden befand

sich eine Frau. Die Antwort: „Nie“ mit einem Gesamtanteil von 15% wurde ausschließlich von weiblichem Proband\*innen angegeben. Mit 85% gab die Mehrheit an zumindest unregelmäßig Videospiele zu spielen. Damit beantworteten die Proband\*innen diese Frage ( $M=2,75$ ) durchschnittlich mit „Mehrere Male im Monat“ ( $SD=2,75$ ).

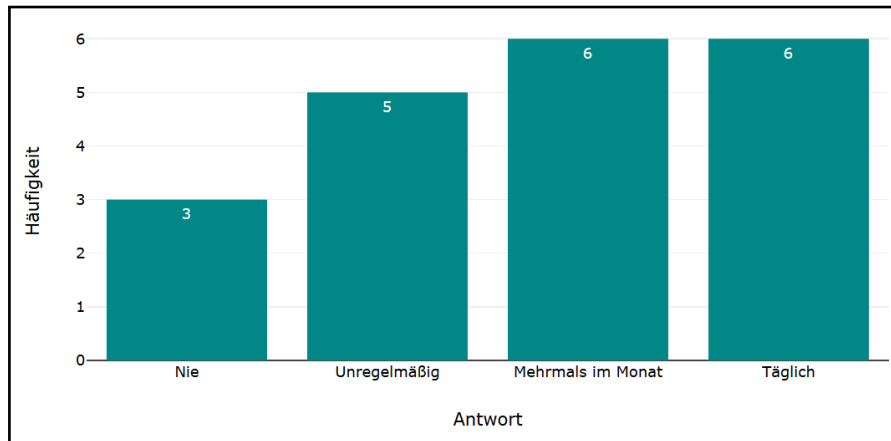


Abbildung 4.12: Die Häufigkeit der Antworten, ob die Proband\*innen Videospiele spielen.

In der darauffolgenden Abbildung 4.13 sind die Häufigkeiten der Antworten zu sehen, inwieweit die Proband\*innen bereits Erfahrung mit VR-Anwendungen hatten. 8 Proband\*innen gaben dabei an Erfahrung mit VR zu haben und 12 keine. Damit hatten 40% der Proband\*innen Erfahrung mit VR und 60% keine. Die knappe Mehrheit der Proband\*Innen hatte folglich keine Erfahrung mit VR. Die Proband\*innen beantworteten damit im Durchschnitt ( $M = 0,42$  wobei 0 = „Nein“ und 1 = „Ja“) diese Frage mit „Nein“. Von den Nutzer\*innen die Erfahrung mit VR hatten, wurde durchschnittlich ( $M = 2,14$  mit  $SD = 0,9$ ) angegeben VR-Devices unregelmäßig zu nutzen. Ein Proband gab an bereits Krankheitssymptome bei der Nutzung eines HMDs gehabt zu haben, dies lag nach den eigenen Aussagen des Probanden jedoch an der damals genutzten Hardware. Die weiteren Ergebnisse der Fragen des Vorabfragebogens werden in der Tabelle 4.1. dargestellt. Dabei wurden von dem Probanden mit der ID=5 angegeben, Probleme mit dem Hören zu haben und dass diese mittels Hörgeräts nicht kompensiert worden sind. Diese Antworten, zu Problemen mit dem Hören, wurden in der Tabelle nicht weiter aufgeführt, da sonst keine\*r der Proband\*innen Probleme mit dem Hören aufwies. Mit 12 Proband\*innen gab die Mehrheit an Probleme mit dem Sehen zu haben ( $M = 0,6$ ), davon mussten 4 eine Brille in dem Experiment nutzen ( $M = 0,4$ ), um scharf sehen zu können. Kein\*e Proband\*in hatte Epilepsie, Probleme mit der Tiefenwahrnehmung oder Probleme beim stereoskopischen Sehen. Es gaben 8 der Proband\*innen mit Sehproblemen an kurzsichtig zu sein und 4 weitsichtig. Davon gab ein Proband an kurz und weitsichtig zu sein. Die Schuh- und Körpergröße der Proband\*innen wurden vor Ort erfragt, wobei die Schuhgröße zum Zuschnitt der Sohlen verwen-

det wurde und nicht im Nachhinein betrachtet wurde. Die Proband\*innen waren durchschnittlich 1,76m ( $M = 1,76$  und  $SD = 0,07$ ) groß mit einer minimalen Größe von 1,63m und einer maximalen von 1,88m.

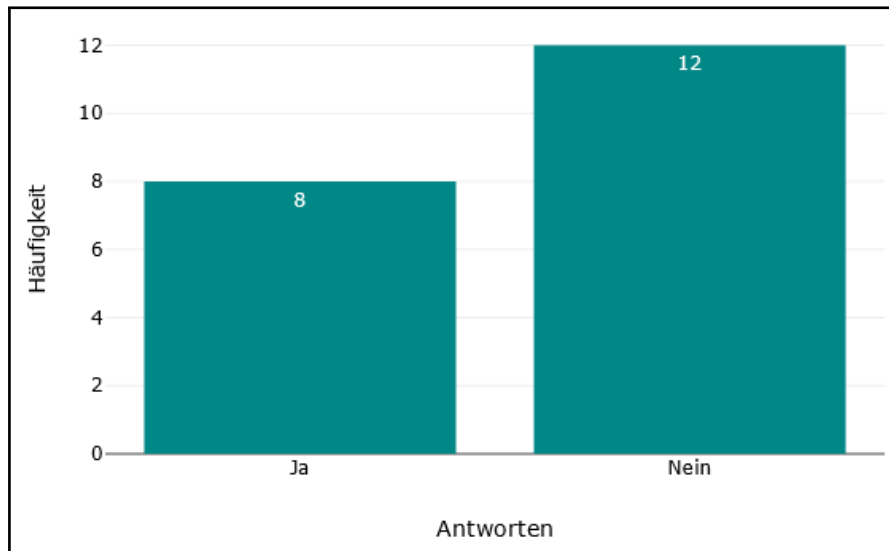


Abbildung 4.13: Die Häufigkeit der Antworten, ob die Proband\*innen Erfahrung mit VR haben.

Tabelle 4.1: Ergebnisse des Vorabfragebogens

	Frage 1	Frage 2	Frage 3	Frage 4	Frage 5
ID	Alter	Geschlecht	Videospiele	Interesse an Technik	Erfahrung mit VR
1	19	Weiblich	Mehrmals im Monat	Trifft eher nicht zu	Ja
2	28	Männlich	Unregelmäßig	Trifft zu	Nein
3	21	Weiblich	Mehrmals im Monat	Trifft zu	Nein
4	47	Weiblich	Nie	Trifft eher zu	Nein
5	51	Männlich	Unregelmäßig	Trifft eher nicht zu	Nein
6	32	Männlich	Täglich	Trifft zu	Ja
7	24	Männlich	Täglich	Trifft zu	Ja
8	22	Männlich	Täglich	Trifft zu	Nein
9	21	Weiblich	Nie	Trifft eher nicht zu	Nein
10	55	Männlich	Unregelmäßig	Trifft zu	Ja
11	50	Weiblich	Nie	Trifft nicht zu	Ja
12	15	Männlich	Mehrmals im Monat	Trifft zu	Nein
13	14	Männlich	Unregelmäßig	Trifft zu	Nein
14	24	Weiblich	Täglich	Trifft eher zu	Nein
15	14	Männlich	Unregelmäßig	Trifft zu	Nein
16	29	Weiblich	Mehrmals im Monat	Trifft zu	Nein
17	22	Männlich	Täglich	Trifft eher zu	Ja
18	27	Männlich	Mehrmals im Monat	Trifft zu	Ja
19	30	Männlich	Täglich	Trifft zu	Nein
20	50	Männlich	Mehrmals im Monat	Trifft zu	Ja

	Frage 5.1	Frage 5.2	Frage 6	Frage 6.1	Frage 6.2
ID	Sympt. bei VR	Häufigkeit der Nutzung	Sehprobleme	Brille oder Kontaktlin.	Probl. Tiefenwahrne.
1	Nein	Unregelmäßig	Nein		
2			Nein		
3			Nein		
4			Ja	Ja	Nein
5			Ja	Ja	Nein
6	Nein	Nie	Ja	Ja	Nein
7	Nein	Täglich	Ja	Ja	Nein
8			Ja	Ja	Nein
9			Ja	Ja	Nein
10	Nein	Unregelmäßig	Ja	Ja	Nein
11	Nein	Unregelmäßig	Nein		
12			Nein		
13			Nein		
14			Ja	Ja	Nein
15			Ja	Ja	Nein
16			Ja	Ja	Nein
17	Ja	Unregelmäßig	Nein		
18	Nein	Unregelmäßig	Ja	Ja	Nein
19			Nein		
20	Nein		Ja	Ja	Nein

	Frage 6.3	Frage 6.4	Frage 6.5	Frage 7	Frage 8
ID	Kurzichtigkeit	Weitsichtigkeit	Verwendet Sehhilfe	Epilepsie	Hörprobleme
1				Nein	Nein
2				Nein	Nein
3				Nein	Nein
4	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
5		Ja	Nein	Nein	Ja
6	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
7	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
8	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
9	Ja	Nein		Nein	Nein
10	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
11				Nein	Nein
12				Nein	Nein
13				Nein	Nein
14	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
15				Nein	Nein
16	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
17				Nein	Nein
18	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
19				Nein	Nein
20	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein

Um eine Art gesundheitlichen Referenzzustand vor und nach dem Experiment ermitteln zu können, wurde der SSQ verwendet. Die Ergebnisse hierzu sind in der Tabelle 4.2. aufgeführt. Der SSQ unterteilt sich in 3 Subskalen, aus denen der sogenannte Total Score berechnet wird, mit dem bestimmt werden kann, ob es sich um einen eher gut oder schlecht bekömmlichen Simulator handelt. Das Kürzel N steht in diesem Fall für Nausea (Übelkeit), O für Oculomotor (okulomotorische Störung) und D für Desorientierung (vgl. Kennedy et al., 1993, S. 203-220). Bei einem Total Score von unter 5 sind diese Krankheitssymptome vernachlässigbar, zwischen 5 und 10 handelt es sich bereits um minimale Symptome, zwischen 10-15 sind die Symptome signifikant und von 15-20 sind diese besorgniserregend. Im Falle das der Total Score bei über 20 liegt, handelt es sich um einen schlechten Simulator (vgl. Stanney, Kennedy und Drexler, 1997, S. 1139).

Die Ergebnisse der Vorabbefragung mittels SSQs ergaben wie in Tabelle 4.3 zu sehen ist, einen durchschnittlichen Total Score von 8,6 vor dem Experiment. Hierbei wurde die von Kennedy angegebene Gewichtung der Subskalen genutzt (vgl. Kennedy et al., 1993, S. 203-220). 9 der 20 Proband\*innen hatten keine Symptome. 4 Proband\*innen hatten bereits vor Beginn des Experimentes einen Total Score > 20. In der Subskala O gaben 75% der Proband\*innen keine Symptome an, bei D waren dies 55% und bei N waren es 45%. Am stärksten vertreten war damit zu Beginn das Gefühl von Übelkeit.

Tabelle 4.2: Ergebnisse des SSQ-Fragebogens vor dem Experiment.

ID	Frage																Symptome			Total Score
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	N	O	D	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3,74
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3,74
4	0	0	0	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	22,44
5	0	1	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	2	2	26,18
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	7,48
15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	7,48
16	1	2	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	1	29,92
17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	7,48
18	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	11,22
19	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	14,96
20	1	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	1	5	3	2	37,4
																M=1,15	M=0,6	M=0,55	M=8,602	

Tabelle 4.3: Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Subskalen sowie des Total Scores vom SSQ-Fragebogen vor dem Experiment.

	N	O	D	Total Score
Mittelwert	1,15	0,6	0,55	8,602
Standardabweichung	1,461	1,188	0,686	11,582
Minimum	0	0	0	0
Maximum	5	4	2	37,4

Damit sind die wesentlichen Ergebnisse der Vorabbefragung in diesem Kapitel vorgestellt worden. Im Kontrast zu dem nächsten Kapitel beruhen sie allein auf Angaben die von den Proband\*innen selbst getätigt worden sind.

#### 4.5.2 Durchläufe

Während der Durchläufe wurden die Daten hauptsächlich von der verwendeten Hardware erfasst. Die Ergebnisse dazu werden für die einzelnen Szenarien zusammengefasst dargestellt, um diese direkt vergleichen zu können. Anzumerken ist, dass die individuellen Daten pro Proband\*in nicht vollständig in diesem Kapitel gezeigt werden. Dies dient der Übersichtlichkeit. Die individuell erhobenen Daten sind im digitalen Anhang beigefügt. Für die Hypothesen und generellen Forschungsfragen relevante Vergleiche und Signifikanzen ( $<0,05$ ) werden in der Diskussion gesondert ausgewertet, um damit direkt argumentieren zu können.

In den Szenarien ergaben sich Unterschiede in der Dauer (in Sekunden) der Durchläufe, wie auf Abbildung 4.14 zu sehen ist. Diese Dauer wurde mittels der Videodaten pro Durchlauf ermittelt. Die Dauer war dabei nicht klar normalverteilt. Die kürzeste Dauer wies dabei das Szenario ohne Manipulationen auf ( $M=36,25$  und  $SD=7,45$ ). Dabei lag die Dauer des kürzesten Durchlaufes bei 24 Sekunden und beim längsten bei 52 Sekunden. Beim Blinking-Szenario hatte die Dauer ( $M=37,5$  und  $SD=8,04$ ) höhere Werte ( $Mdn = 35$ ) als beim Szenario ohne Manipulationen ( $Mdn = 34,5$ ). Die minimale Dauer während des Blinking-Szenarios betrug 27 Sekunden und die maximale 61 Sekunden. Die Nullhypothese, dass die Werte beim Blinking-Szenario einen kleineren oder gleichen Median bei der Dauer aufweisen, wie bei dem Szenario ohne Manipulation, wurde mit Hilfe eines Mann-Whitney-U Tests geprüft. Das Ergebnis war statistisch nicht signifikant  $p = 0,292$ . Diese Nullhypothese wurde damit beibehalten. Das zweitlängste Szenario war das ASRDW-Szenario ( $M = 44,35$ ,  $SD = 18,46$  und  $Mdn = 38,5$ ) das durchschnittlich 8 Sekunden länger dauerte als das Szenario ohne Manipulationen. Die Nullhypothese, dass das ASRDW-Szenario einen kleineren oder gleichen Median bei der Dauer aufwies, wie in dem Szenario ohne Manipulationen, wurde mit ebenfalls mit dem Mann-Whitney-U Tests geprüft. Das Ergebnis war statistisch nicht signifikant  $p = 0,111$ . Die Nullhypothese wurde damit beibehalten. Das längste Szenario war damit das Kombinationsszenario ( $M = 48,75$ ,  $SD = 23,58$  und  $Mdn = 44$ ). Der Unterschied zu dem Szenario ohne Manipulation war nach dem Mann-Whitney-U (MWU) Test dabei signifikant höher  $p = 0,036$ .



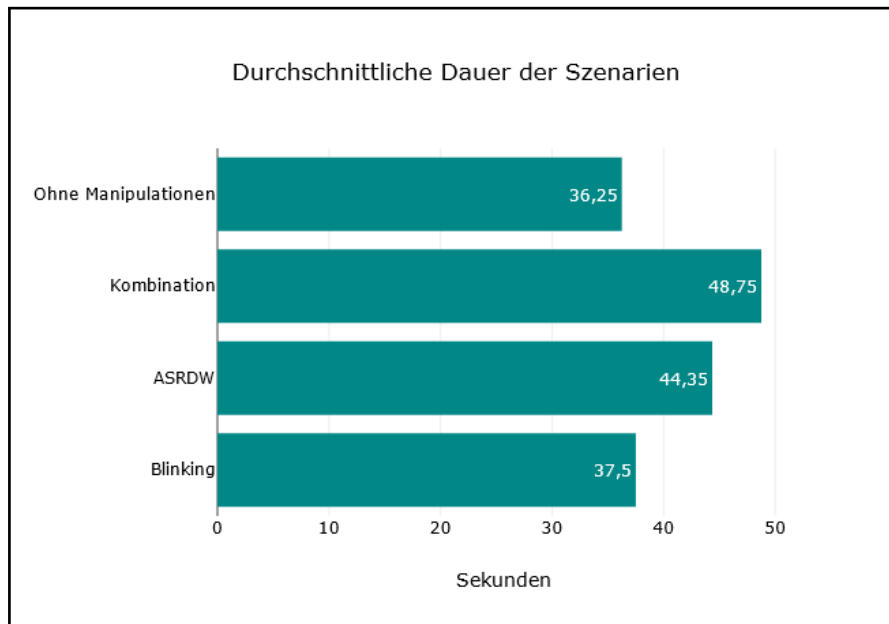


Abbildung 4.14: Die durchschnittliche Dauer pro Szenario.

Die durchschnittliche Anzahl der Schritte wurde mit dem Step-Detector gemessen. Die Daten waren in diesem Falle nicht eindeutig normalverteilt, weshalb nicht-parametrisch getestet wurde. Anzumerken ist, dass es bei dem Szenario ohne Manipulationen zwei Fälle gab in denen doppelte Schritte zum Teil ausgelöst wurden, da die Sensoren nicht ideal unter der Sohle platziert wurden. Diese traten nach Aussagen der Proband\*innen in den Fällen nur wenige Male (zwischen 1-5-mal) auf, weshalb diese nicht herauskorrigiert wurden. Analog zu der Dauer der Szenarien gab es zwischen dem Szenario ohne Manipulationen ( $M = 48,4$ ,  $SD = 7,33$  und  $Mdn = 46,5$ ) und dem Blinking-Szenario ( $M = 48,3$ ,  $SD = 8,50$  und  $Mdn = 44$ ) keinen signifikanten Unterschied nach MWU mit  $p = 0,641$ . Dies galt nicht für das ASRDW-Szenario ( $M = 59,2$ ,  $SD = 24,1$  und  $Mdn = 50$ ) das mit einem MWU mit  $p = 0,038$  statistisch signifikant mehr Schritte aufwies, als das Szenario ohne Manipulationen. Das Kombinationsszenario ( $M = 48,75$ ,  $SD = 19,94$  und  $Mdn = 53$ ) wies mit einem MWU mit  $p = 0,026$  signifikant mehr Schritte auf als in dem Szenario ohne Manipulationen. Der Unterschied zwischen den Kombinationsszenario und dem ASRDW-Szenario war dagegen nicht statistisch signifikant mit einem MWU mit  $p = 0,41$ . Die minimale Anzahl der Schritte wurde mit 36 Schritten im Kombinationsszenario gemessen und die maximale im ASRDW-Szenario mit 148 Schritten.

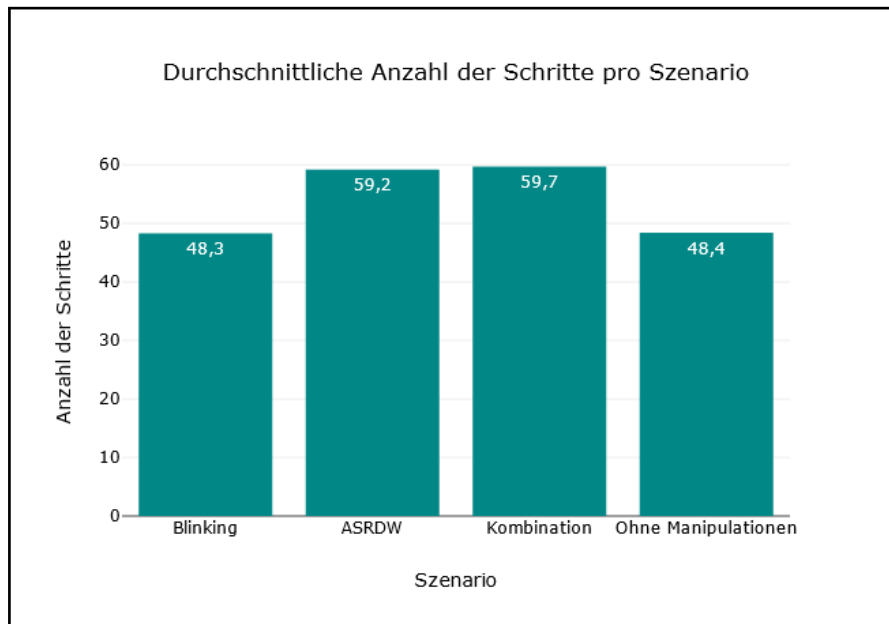


Abbildung 4.15: Die durchschnittliche Anzahl der gelaufenen Schritte pro Szenario.

Neben der absoluten Dauer der Szenarien wurden die Geschwindigkeiten während der Durchläufe erfasst. Um dies einheitlich und möglichst vergleichbar darzustellen, wurden die Geschwindigkeiten (in m/s) pro halben Meter bis zum Zielpunkt angegeben, dies ist auf den Abbildungen 4.16 bis 4.19 pro Szenario dargestellt. Bei dieser Darstellung wird nicht die Gesamtdauer vom Startpunkt zum Zielpunkt betrachtet, sondern jeder gelaufene halbe Meter wird gleich gewichtet. Damit könnte zum Beispiel ein\*e Proband\*in innerhalb eines halben Meters für 10 Sekunden stehen bleiben und dies würde nur innerhalb des halben Meters Einfluss auf den dort berechneten Mittelwert haben. Dieser Unterschied fällt dabei noch geringer ins Gewicht, wenn ein\*e Proband\*in sich innerhalb dieses Bereiches mal schneller oder langsamer bewegen würde. Alle in diesem halben Meter ermittelten Geschwindigkeiten würden einen Durchschnittswert ergeben, der dann für diesen halben Meter als ein Wert dargestellt werden würde. Der Vorteil an diesem Prinzip ist, dass innerhalb dieser 40 Messpunkte (40x0,5m) theoretisch beliebig viele Schritte geschehen könnten und damit ein genauer Geschwindigkeitswert ermittelt werden kann. Der Nachteil dabei ist, dass dabei die Gesamtdauer bis zum Zielpunkt nicht innerhalb der Meter betrachtet wird, sondern nur die Geschwindigkeiten zwischen einzelnen Punkten innerhalb dieser halben Meter. Sie können daher nichts über die absolute Durchschnittsgeschwindigkeit vom Start- bis zum Zielpunkt aussagen, sondern nur die dazwischen ermittelten Geschwindigkeiten darstellen. Diese Abbildungen sind damit primär für die Interpretation der Bewegungscharakteristik relevant, weshalb sie nicht zusätzlich transformiert worden sind, um der ermittelten, durchschnittlichen Gesamtdauer zu entsprechen. Die Unterschiede der absoluten Durchschnittsgeschwindigkeiten vom Start- bis zum Zielpunkt wurden bereits mit der Betrachtung der Gesamtdauer aufgezeigt. In allen Abbildungen 4.16 bis 4.19 zeigt sich das die durchschnittliche

Anfangsgeschwindigkeit zu Beginn in allen Szenarien zwischen 0,6 bis 0,8 m/s lag. In jedem Szenario kam es zwischen dem zweiten und dritten Meter zu einem Anstieg der Geschwindigkeit, die zwischen dem 2,5m und 3m wieder abfiel. Dabei blieb in den beiden Szenarien mit ASRDW die Geschwindigkeit bei unter 0,7m/s in den nächsten 4 Metern bis zu mindestens 6,5m des virtuellen Pfades. Die beiden Szenarien ohne akustische Manipulation wiesen im Kontrast dazu höhere, fluktuierende Durchschnittsgeschwindigkeiten mit 0,7 bis über 0,8 Metern im Peak auf. Nach den 6,5 Metern kam es zu ähnlichen fluktuierenden Peaks in den Szenarien mit ASRDW. Das Szenario mit den höchsten Geschwindigkeiten war dabei das Szenario ohne Manipulationen. Dies lag knapp über den Werten aus dem Blinking-Szenario wie es bereits in der Gesamtdauer gezeigt wurde. Im Bereich des letzten Meters vor dem Zielpunkt verhielten sich die Geschwindigkeiten charakteristisch identisch und fielen rapide ab.

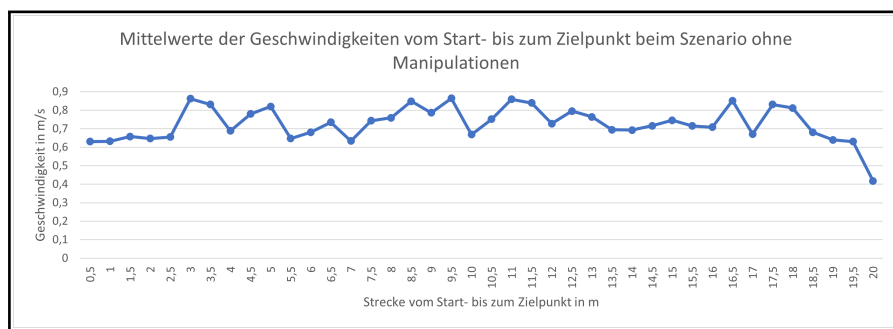


Abbildung 4.16: Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des Szenarios ohne Manipulationen.

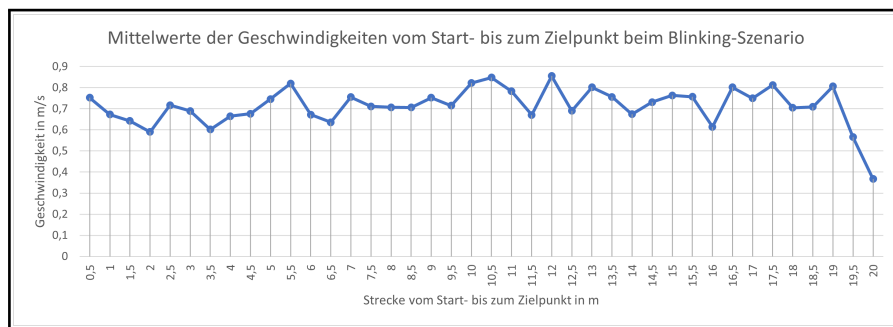


Abbildung 4.17: Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des Blinking-Szenarios.

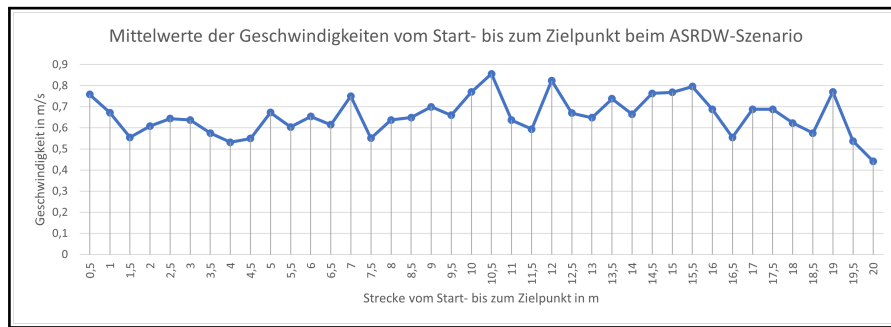


Abbildung 4.18: Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des ASRDW-Szenarios.

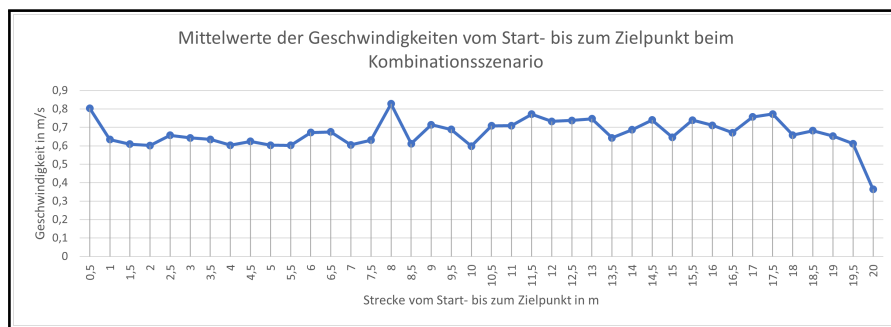


Abbildung 4.19: Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während des Kombinationsszenarios.

Neben den Sensoren des HMDs und des Step-Detectors wurden die erkannten Blinzler der Probanden über das Eye-Tracking ermittelt. Hierbei wurden nur die Blinzler ausgewertet, die tatsächlich zu einer Manipulation geführt haben und nicht in dem Fall, bei dem zum Beispiel die Augen einzeln geschlossen waren. Als Darstellungsform wurde ein Flussdiagramm verwendet, in dem die durchschnittlichen Blinzler pro halben Meter aufsummiert wurden. Damit kann leichter abgelesen werden zu welchem Abschnitt bis zum Zielpunkt ein ganzer Blinzler im Durchschnitt aufgetreten ist. Bei der grafischen Darstellung gab es bei dem Szenario ohne Manipulationen in der ermittelten Summe eine Diskrepanz zu der absoluten Messung von ca. -0,4 Blinzlern. Um diese auszugleichen wurden die Durchschnittswerte aller Blinzler um +0,01 Blinzler angehoben und damit transformiert. Wie auch bei der Geschwindigkeit sollte hierüber primär die Charakteristik beim Auftreten der Blinzler betrachtet werden, wobei diese Unterschiede in der Interpretation höher ins Gewicht fallen und deswegen angeglichen worden sind. Bei dem akustischen Szenario gab es einen Unterschied von -0,1 Blinzlern zu der absoluten Messung, weshalb dort die Werte um +0,0025 Blinzler angehoben wurden und beim Blinking einen von -0,15 Blinzlern, bei dem die Werte um +0,0035 Blinzler angehoben wurden. Bei dem Kombinationsverfahren gab es keinen Unterschied zu den absoluten Werten. Die Darstellung des Szenarios ohne Manipulation musste damit am stärksten für eine passende Darstellung transformiert werden. Dies hatte keinen Einfluss auf den Ver-

suchsablauf und wird lediglich für die Transparenz aufgeführt. Im Blinking-Szenario ( $M = 2,95$ ,  $SD = 3,80$  und  $Mdn = 1,5$ ) fand nach dem MWU mit  $p = 0,823$  keine signifikant höhere Anzahl an Blinzlern statt, als im Szenario ohne Manipulationen ( $M = 3,8$ ,  $SD = 3,76$  und  $Mdn = 3$ ), hierbei lagen das Maximum an erkannten Blinzlern bei 13 und das Minimum bei 0. Beim ASRDW-Szenario ( $M = 3,85$ ,  $SD = 3,8$  und  $Mdn = 4$ ) gab es nach MWU mit  $p = 0,431$  und beim Kombinationsszenario ( $M = 3,85$ ,  $SD = 3,86$  und  $Mdn = 2,5$ ) mit  $p = 0,431$  ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zu dem Szenario ohne Manipulationen. Alle vier Szenarien in den Abbildungen 4.16 bis 4.19 weisen ihr Maximum an Blinzlern innerhalb eines halben Meters direkt zu Beginn auf. Die Gesamtmenge der durchschnittlichen Blinzler lag beim Blinking Szenario mit ca. 1 Blinzler unter den Mittelwerten der anderen drei Szenarien, die zwischen 3,8-3,9 Blinzlern im Durchschnitt lagen. Betrachtet man die Distanz von jedem halben Meter aus zum virtuellen Zielpunkt als Länge, die 0,6 Grad Rotation (durch die Ausgleichsbewegung) wie den Winkel einer linearen Steigungsfunktion und ermittelt die daraus resultierende Höhe (beziehungsweise Abweichung) und multipliziert diese mit der in diesem halben Meter auftretenden durchschnittlichen Anzahl an Blinzlern, so ergibt sich, wenn man die Ergebnisse daraus summiert, eine durchschnittliche zu erwartende Abweichung bis zur Ziellinie pro Szenario. Beim Blinking-Szenario wären dies durchschnittlich eine positive Abweichung von ca. >28cm, beim ASRDW-Szenario wären dies ca. >40cm, beim Kombinationsszenario ca. >47cm und dem Szenario ohne Manipulation ca. >31cm. Dies ließe sich exakt ermitteln, wenn man die Distanzen bis zur realen Ziellinie kennen würde in denen die Ausgleichsbewegung stattgefunden hat und der Prämisse das diese Bewegung als Ausgleichsbewegung klassifiziert werden konnte. Da diese Fragen in dieser Arbeit nicht geklärt werden können, ist dieser naive Ansatz zur Ermittlung der zu erwartenden Abweichung verwendet worden.

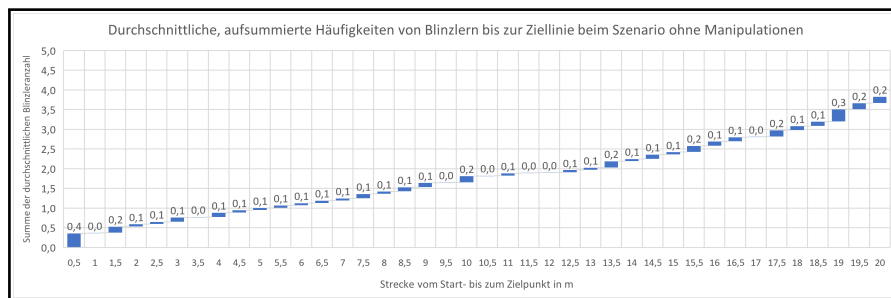


Abbildung 4.20: Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des Szenarios ohne Manipulationen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Messungen mittels Sensoren, ergaben sich die absoluten Ergebnisse der Abweichungen vom Zielpunkt, aus einer vor Ort stattgefundenen optischen Messung und durch die von der Cosmos ermittelten Koordinate. In der Tabelle 4.4 sind diese pro Proband\*in und Szenario aufgeführt. Im Gegensatz zu den Messungen der Cosmos, wurden die Werte in der Praxis mit einer Messgenauigkeit von 10cm gemessen, wobei

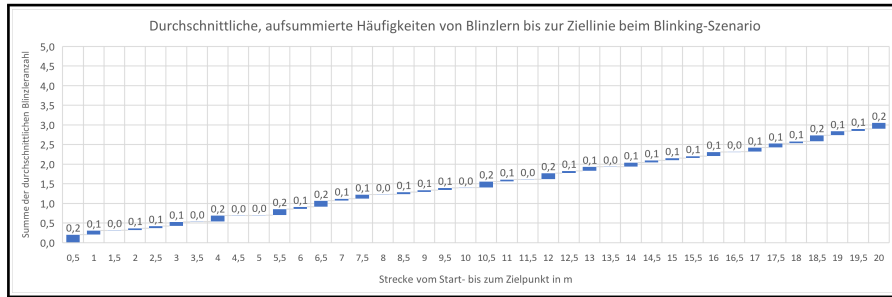


Abbildung 4.21: Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des Blinking-Szenarios.

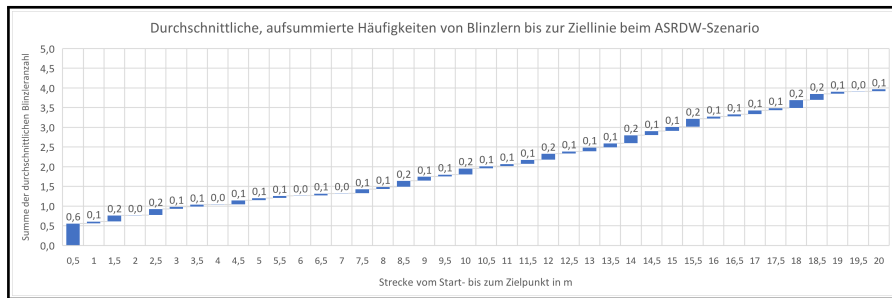


Abbildung 4.22: Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des ASRDW-Szenarios.

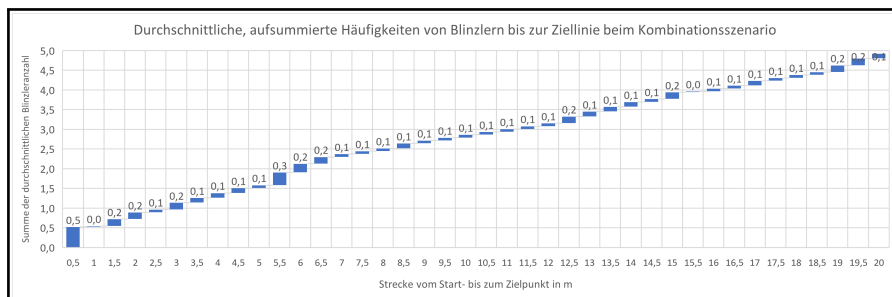


Abbildung 4.23: Flussdiagramm mit den aufsummierten Mittelwerten der Blinzler während des Kombinationsszenarios.

hier im Zweifelsfall abgerundet wurde. In der Tabelle 4.4 wurden dazu Mittelwert, Median, Standardabweichung, Minimum und Maximum angegeben. Die Ergebnisse lagen in allen Szenarien in einem maximal negativen Bereich von -90cm und einem Maximum von 510cm. Die Standardabweichungen sind in den Szenarien mit ASRDW höher als in denen Szenarien ohne. Weitere Vergleiche dieser Szenarien untereinander werden in der Diskussion in Kapitel 5 aufgeführt, da sie für die Prüfung der Hypothesen dieser Arbeit essenziell sind.

Tabelle 4.4: Die Abweichungen vom Zielpunkt am Ende der Durchläufe (in cm)

ID	Blinking	ASRDW	Kombination	Ohne Manipulationen
1	50	220	300	-30
2	0	250	330	10
3	-20	210	390	30
4	-10	100	250	-80
5	0	230	400	40
6	-20	240	230	-10
7	0	250	240	-90
8	-40	200	510	110
9	-10	170	100	-10
10	-20	220	400	80
11	0	10	90	-10
12	0	190	220	10
13	10	0	90	-40
14	-90	70	170	20
15	-50	100	80	-50
16	60	60	80	20
17	60	260	300	0
18	40	270	200	80
19	40	260	390	50
20	40	40	220	80
<b>Mittelwert</b>	2	167,5	249,5	10,5
<b>Median</b>	0	205	235	10
<b>Standardabweichung</b>	38,471	91,357	126,885	53,751
<b>Minimum</b>	-90	0	80	-90
<b>Maximum</b>	60	270	510	110

In den Abbildungen 4.24 bis 4.27 sind die durchschnittlich gelaufenen Pfade angegeben. Diese wurden analog zu der Darstellung der Blinzler pro halben Meter ausgewertet und die daraus resultierenden durchschnittlichen Koordinaten pro halben Meter ergaben einen Pfad, der in Excel linear interpoliert wurde. Dabei dienen die gezeigten Pfade der Darstellung der Charakteristik der Szenarien, welche in der Diskussion aufgegriffen wird. Der Startpunkt lag bei allen Pfaden bei  $x=0m$  und  $y=0m$ , der Endpunkt bei variablen  $x$ -Werten und  $y=20m$ . Das Kombinationsszenario war das einzige Szenario bei dem eine klare positive Abweichung innerhalb der ersten 2 Meter stattgefunden hat. In allen anderen Szenarien begann diese zwischen den ersten 2-3m. Bei dem Blinking-Szenario bildete der Pfad eine Kurve, die nach einer positiven Abweichung auf der X-Achse nach der Hälfte der Strecke wieder in den negativen Bereich tendierte.

Die Ergebnisse der Abweichungen der Szenarien sind als Boxplots in Abbildung 4.28 aufgeführt. Diese Darstellungsform wurde gewählt, um neben dem Mittelwert auch die Standardabweichung, Quantile, sowie die Minima und Maxima der Szenarien direkt vergleichen zu können. Dabei zeigt sich das der Wertebereich der Ergebnisse des Kombinationsszenarios am größten ist und in jedem Falle eine positive Abweichung stattgefunden hat. Die



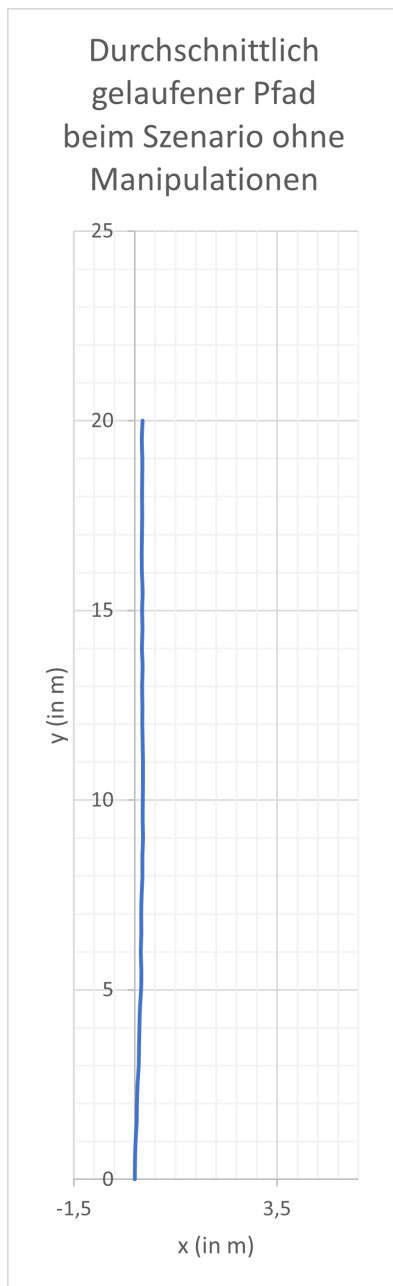


Abbildung 4.24: Durchschn.  
Pfad beim  
Szenario ohne  
Manipulationen.

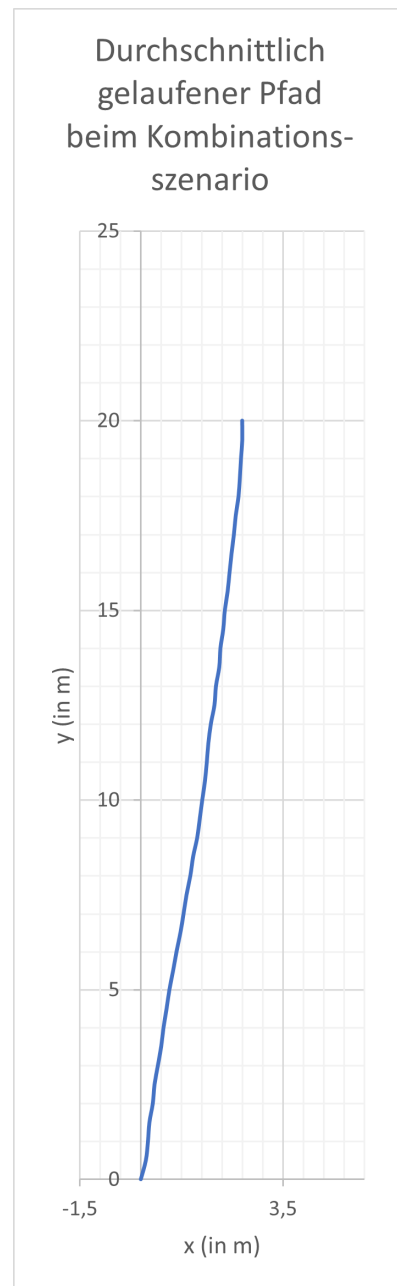


Abbildung 4.25: Durchschnittli-  
cher Pfad beim  
Kombinationsze-  
nario.

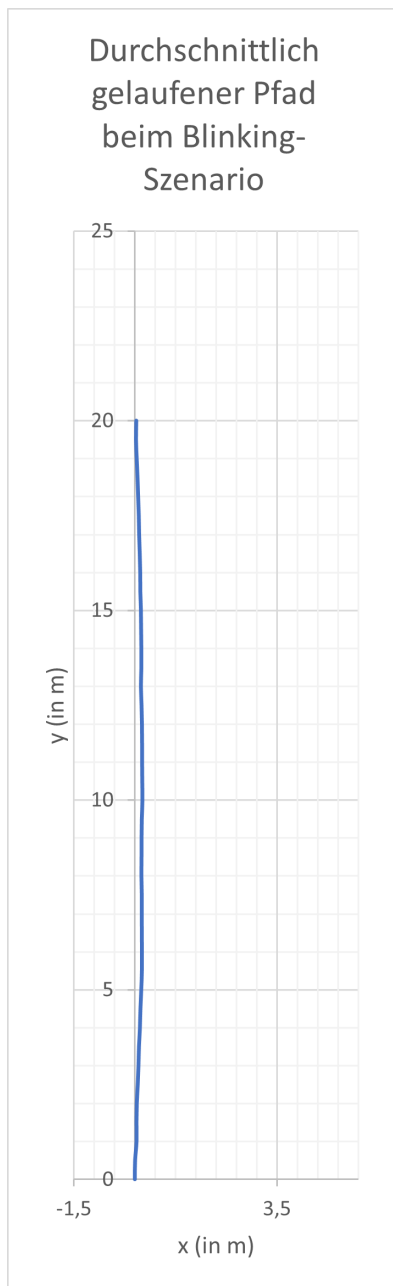


Abbildung 4.26: Durchschnittlich  
gelaufener Pfad  
beim Blinking-  
Szenario.

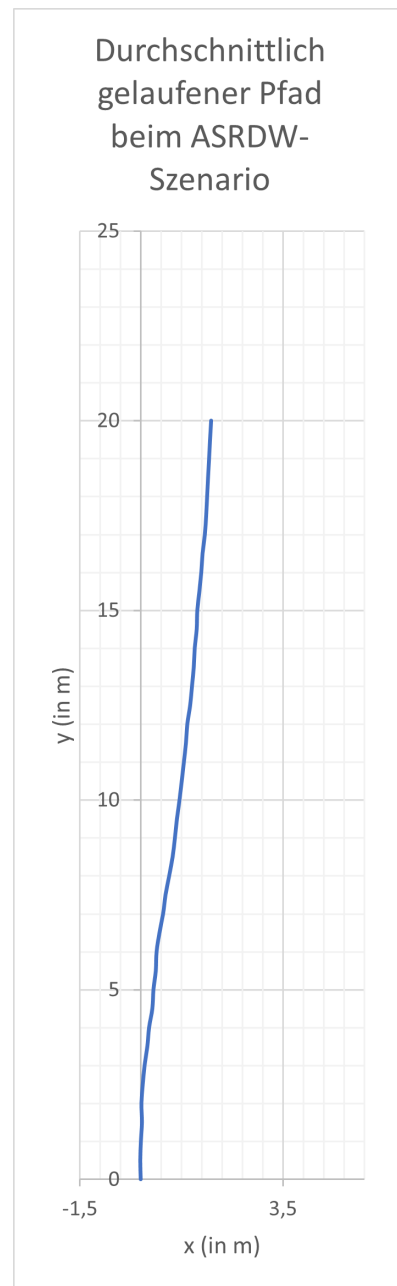


Abbildung 4.27: Durchschnittlich  
gelaufener Pfad  
beim ASRDW-  
Szenario.

Mediane des ASRDW- und Kombinationsszenarios lagen dabei 30cm auseinander. Der Wertebereich der Ergebnisse des Szenarios ohne Manipulationen lag zwischen -90cm bis +110cm und schneidet damit die Wertebereiche der Ergebnisse aller vier Szenarien. Die Mediane und Mittelwerte des Szenarios ohne Manipulationen und des Blinking-Szenarios liegen dabei am dichtesten beieinander und zwischen 0cm bis 10,5cm.

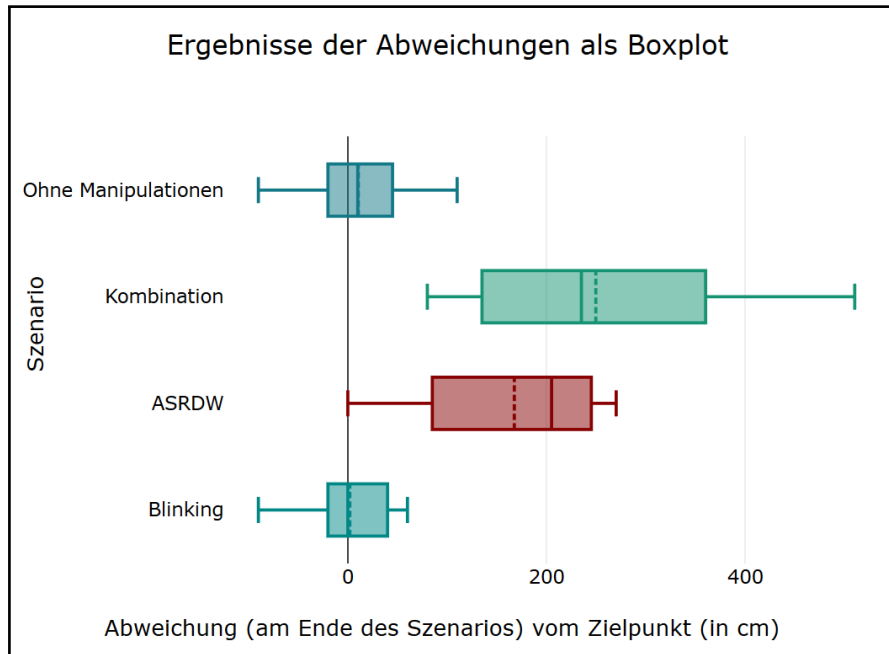


Abbildung 4.28: Die durchschnittlichen gemessenen Abweichungen vom Zielpunkt.

Manipulation wurden keine Manipulationen von den Proband\*innen bemerkt. Bei der Probandin mit der ID=11 gab es Probleme mit einem Sensor, weshalb diese angab das ihr Schrittgeräusch doppelt ausgelöst wurde. Dies trat am gleichen Tag im gleichen Szenario bei einem Probanden mit der ID=17 wiederholt auf. Der Proband mit der ID=12 gab an durch eine Lichtquelle gegangen zu sein, was durch die virtuelle Umgebung für alle Proband\*innen zu erwarten war, dies galt auch für das Windgeräusch, dass von dem Probanden mit der ID=19 wahrgenommen wurde. Beim Blinking-Szenario wurden von der ID=11 verzögerte Schritte nach der Justierung der Sensoren wahrgenommen. Diese wurden ausgetauscht wonach keine Angaben mehr zu Problemen mit den Schrittgeräuschen von den Proband\*innen gemeldet wurden. Im Blinking Szenario wurde keine Manipulation von den Proband\*innen festgestellt. Beim ASRDW Szenario bemerkten 4 Proband\*innen die Manipulation. Zwei gaben an das sich das Haus mit ihnen mitbewegt hat und bewerteten dieses auf einer Skala von 1-5 mit einer 4 von 5, wobei 5 bedeutet, dass sie es deutlich bemerkt haben. Zwei gaben an leichte Unterschiede zwischen dem real gelaufenen Pfad und dem virtuellen zu bemerken und bewerteten dieses mit einer 1, womit sie angaben dies kaum bemerkt zu haben. Zwei Proband\*innen gaben in dem Szenario an ein anderes Geräusch gehört zu haben beziehungsweise ins Wasser getreten zu

sein, was auch beim ASRDW so vorgesehen war. Damit bemerkten 20% der Proband\*innen die Manipulation des ASRDW-Verfahrens, wobei jene die es deutlich merkten, dies vor allem durch die optische Diskrepanz feststellten und nicht durch die akustische. Die gleichen Probanden stellten im Kombinationsverfahren fest, dass sich das Haus mit ihnen mitbewegt. Der Proband mit der ID=17 gab an dies deutlich zu bemerken. Der Proband mit der Nummer 13 gab hierbei auch an dies deutlich zu bemerken, gab aber bei der Skala eine 4 an. Wie beim ASRDW-Szenario gab ein Proband an das Wassergeräusch gehört zu haben und ein Proband gab an das plötzlich ein Dach über der Tür des Hauses zu sehen war. Bei dem Kombinationsszenario bemerkten damit 10% der Proband\*innen eine Manipulation.

In der Tabelle 4.6 wurden die Abweichungen der Proband\*innen nach Geschlechtern getrennt verglichen. Die Männer erreichten dabei im Durchschnitt höhere Abweichungen als die Frauen in allen Szenarien, was in der Diskussion genauer betrachtet wird.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Zwischenfragebögen nach jedem Szenario.

Die Ergebnisse der Befragung nach den einzelnen Szenarien																			
ID	(1 = Ja, 0 = Nein)			Szenario ohne Manipulationen			(1=kaum bemerkt, 5=deutlich bemerkt)			ID	(1 = Ja, 0 = Nein)			ASRDW-Szenario			(siehe linkes Szenario)		
	Frage 1	Frage 2	Frage 3	Anmerkung			Opt. Manip.	Akust. Manip.	Frage 1		Frage 2	Frage 3	Anmerkung			Opt. Manip.	Akust. Manip.		
1	1	1	0						1	1	1	0							
2	1	1	0						2	1	1	0							
3	1	1	0						3	1	1	0							
4	1	1	0						4	1	1	0							
5	1	1	0						5	1	1	0							
6	1	1	0						6	1	1	0							
7	1	1	0						7	1	1	0							
8	1	1	0						8	1	1	0							
9	1	1	0						9	1	1	0							
10	1	1	0						10	1	1	0							
11	1	1	1	Rechter Fuß hat doppelt ausgelöst					11	1	1	1	Zielobjekt nicht mit Kiesweg kompatibel	1		1			
12	1	1	1	Durch Lichtquelle gegangen					12	1	1	1	Anderes Geräusch						
13	1	1	0						13	1	1	1	Haus bewegt sich mit	4		4			
14	1	1	0						14	1	1	0							
15	1	1	0						15	1	1	1	Leichter unterschied zu real	1		1			
16	1	1	0						16	1	1	1	Ins Wasser getreten						
17	1	1	1	Am Anfang doppeltes Schrittgeräusch					17	1	0	1	Haus wandert mit mir	4		4			
18	1	1	0						18	1	1	0							
19	1	1	1	Windgeräusch wahrgenommen					19	1	1	0							
20	1	1	0						20	1	1	0							
ID	(1 = Ja, 0 = Nein)			Blinking-Szenario			(1=kaum bemerkt, 5=deutlich bemerkt)			ID	(1 = Ja, 0 = Nein)			Kombinationsszenario			(siehe Szenario links)		
	Frage 1	Frage 2	Frage 3	Anmerkung			Opt. Manip.	Akust. Manip.	Frage 1		Frage 2	Frage 3	Anmerkung			Opt. Manip.	Akust. Manip.		
1	1	1	0						1	1	1	0							
2	1	1	0						2	1	1	0							
3	1	1	0						3	1	1	0							
4	1	1	0						4	1	1	0							
5	1	1	0						5	1	1	0	Fuß war im Wasser						
6	1	1	0						6	1	1	0							
7	1	1	0						7	1	1	0							
8	1	1	0						8	1	1	0							
9	1	1	0						9	1	1	0							
10	1	1	0						10	1	1	0							
11	1	1	0	Verzögerte Schritte					11	1	1	0							
12	1	1	0						12	1	1	0							
13	1	1	0						13	1	1	1	Deutliche Ablenkung	4		4			
14	1	1	0						14	1	1	0							
15	1	1	0						15	1	1	0							
16	1	1	0						16	1	1	1	Da war ein Dach über der Tür						
17	1	1	0						17	1	0	1			5		5		
18	1	1	0						18	1	1	0							
19	1	1	0						19	1	1	0							
20	1	1	0						20	1	1	0							

4.5.3 Evaluation

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse, im Gegensatz zum vorherigen Kapitel, allein aus Fragebögen ermittelt. Die dabei verwendeten Fragebögen

Tabelle 4.6: Die durchschnittlichen Abweichungen vom Zielpunkt am Ende der Durchläufe der Männer (in cm)

	Blinking (Männer)	ASRDW (Männer)	Kombination (Männer)	Ohne Manipulationen (Männer)
<b>Mittelwert</b>	4,615	193,077	277,692	20,769
<b>Median</b>	0	230	240	10
<b>Standardabweichung</b>	33,069	89,012	125,973	59,366
<b>Minimum</b>	-50	0	80	-90
<b>Maximum</b>	60	270	510	110

Tabelle 4.7: Die durchschnittlichen Abweichungen vom Zielpunkt am Ende der Durchläufe der Frauen (in cm)

	Blinking (Frauen)	ASRDW (Frauen)	Kombination (Frauen)	Ohne Manipulation (Frauen)
<b>Mittelwert</b>	-2,857	120	197,143	-8,571
<b>Median</b>	-10	100	170	-10
<b>Standardabweichung</b>	49,57	80,829	119,682	38,048
<b>Minimum</b>	-90	10	80	-80
<b>Maximum</b>	60	220	390	30

sind der deutsche IPQ (*igroup presence questionnaire 15.10.2020*) und der ins Deutsche übersetzte SSQ (vgl. Kennedy et al., 1993, S. 203-220). Beim IPQ ist zu erwähnen, dass dessen Items bei dieser Arbeit in einer 5-stufigen Likert-Skala angegeben worden sind. Die Druckversionen der Fragebögen sind im digitalen Anhang beigefügt.

Die durchschnittlichen Ergebnisse des IPQs-Fragebogens sind in der Abbildung 4.29 als Netzdiagramm dargestellt. Der Wert 3 steht dabei für eine neutrale Antwort. Bis auf den erlebten Realismus wiesen alle Subskalen einen positiven Trend auf. Eine ausführlichere Darstellung der Werte ist in Tabelle 4.8 aufgeführt.

Tabelle 4.8: Ergebnisse des IPQ-Fragebogens nach dem Experiment.

	Das Gefühl, dort zu sein	Beteiligung	Räumliche Präsenz	Erlebter Realismus
<b>Mittelwert</b>	3,8	3,238	3,36	2,463
<b>Median</b>	4	3	4	2
<b>Standardabweichung</b>	1,105	1,362	1,541	1,252
<b>Minimum</b>	2	1	1	1
<b>Maximum</b>	5	5	5	5
M=3,215				

In der Tabelle 4.9 sind die Ergebnisse des SSQ-Fragebogens nach dem Experiment dargestellt und in der Tabelle 4.10 weitere Werte dazu. Im unteren, rechten, grauen Bereich der Tabelle 4.9 sind die Mittelwerte der Subskalen und des Total Scores aufgezeigt.

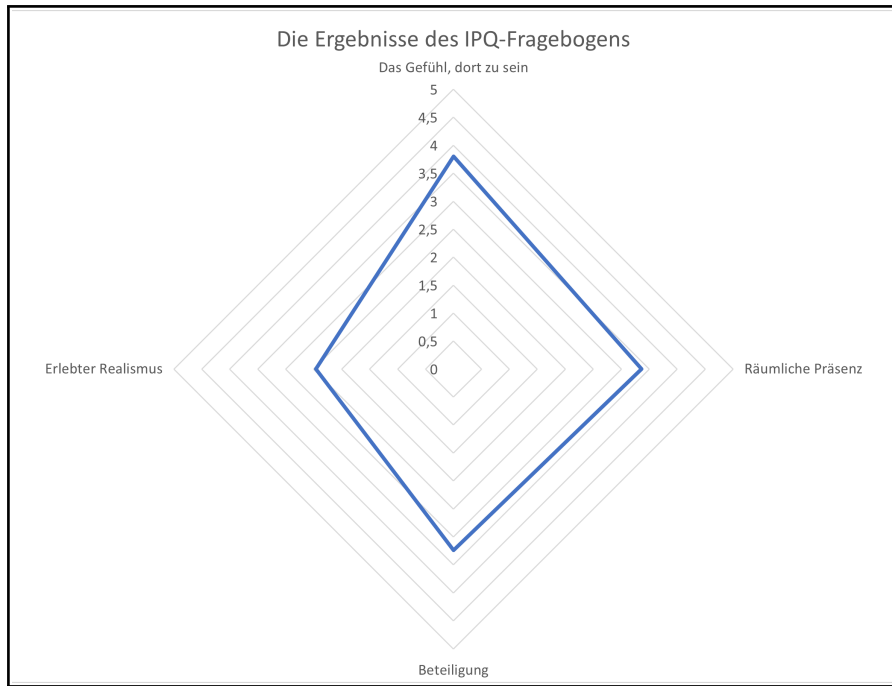


Abbildung 4.29: Die durchschnittlichen Ergebnisse der IPQ-Subskalen als Netzdiagramm.

Tabelle 4.9: Ergebnisse des SSQ-Fragebogens nach dem Experiment.

ID	Frage																Symptome			Total Score
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	N	O	D	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3,74
3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	7,48
4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	14,96
5	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	2	3	22,44
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3,74
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3,74
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3,74
19	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	7,48
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
																	0,4	0,3	0,2	3,366

Tabelle 4.10: Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Subskalen sowie des Total Scores vom SSQ-Fragebogen nach dem Experiment.

	N	O	D	Total Score
Mittelwert	0,4	0,3	0,2	3,366
Standardabweichung	0,681	0,657	0,696	5,932
Minimum	0	0	0	0
Maximum	2	2	3	22,44

Mit diesem Kapitel endet die Darstellung der Ergebnisse aus dieser Arbeit. Sie wurden auf die Forschungsfragen reduziert und bieten Daten für weitere Analysen. Im nächsten Kapitel werden diese Daten interpretiert.

## DISKUSSION

---

In der Diskussion werden die Erkenntnisse aus diesem Experiment interpretiert, Hypothesen geprüft und explorative sowie empirische Ergebnisse aus dieser Arbeit zusammengefasst. Das neue ASRDW-Verfahren auf die generelle Machbarkeit zu testen, stand in der gesamten Arbeit im Fokus und ist am Inhalt bemessen eine Sammlung verschiedener Verfahren, dies zu prüfen. Die aufgestellten Hypothesen und erfassten Daten dienen dabei zur Prüfung des ASRDW-Verfahrens. Dabei wurde Wert auf ein praktisch verwendbares Verfahren gelegt, was die Eingrenzung in dieser Arbeit auch auf qualitativer Ebene erfordert hat. Der Rahmen dieser Arbeit ist damit als eine integrative Prüfung des Verfahrens zu betrachten weshalb verschiedene Betrachtungswinkel gewählt worden sind. Dies hat den Nachteil das die betrachteten Ebenen in ihrer Gänze, wie zum Beispiel Detektionsschwellen, Gains, Variationen im Design und umfassendere qualitative Fragen nicht mit dieser Arbeit beantwortet werden können. Der Vorteil ist, dass dieser Querschnitt aus Perspektiven, die Relevanz für praktische Implementationen veranschaulicht und damit eine Grundlage für weitere Forschung in diesem Bereich sein kann.

### 5.1 INTERPRETATION DER HYPOTHESEN

Die in Kapitel 3.1 vorgestellte Nullhypothese  $H_0$  zu  $H_1$  lautete: Das in dem Experiment angewendete ASRDW erzielt durchschnittlich eine kleinere oder gleiche Abweichung wie keine angewendete Manipulation.

Um dies zu prüfen, fand randomisiert ein Durchlauf ohne Manipulationen in dem Experiment statt. Bei diesem wurden die Abweichungen vom Zielpunkt gemessen. Dabei ergaben sich keine klaren Normalverteilungen, was aus der geringen Anzahl der Proband\*innen ( $N = 20$ ) resultiert sein kann. Die Ergebnisse dazu sind in der Tabelle 4.4 aufgelistet. Es wurde in allen Tests ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  gewählt

$H_1$ : Da die Ergebnisse der Abweichungen vom Startpunkt nicht normalverteilt waren, wurde die statistische Signifikanz mit dem nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Test berechnet. Bei dem Szenario ohne Manipulationen hatten die Proband\*innen niedrigere Werte ( $Mdn = 10$ ) als in dem ASRDW-Szenario ( $Mdn = 205$ ). Ein Mann-Whitney U-Test zeigte, dass dieser Unterschied statistisch signifikant war,  $U = 37$ ,  $p = < 0,001$ ,  $r = 0,698$ . Daher ist es wahrscheinlich, dass das in diesem Experiment angewendete ASRDW-Verfahren in den meisten Fällen eine höhere positive Abweichung vom Zielpunkt erzielt, als keine angewendete Manipulation, womit die dazu definierte  $H_0$  abgelehnt wird. Es kann damit angenommen werden das ASRDW wahrscheinlich funktioniert.



H<sub>2</sub>: Für H<sub>2</sub> wurde die Nullhypothese aufgestellt, dass die Probanden während des ASRDW-Szenarios durchschnittlich bemerken, dass sie sich nicht gerade aus auf den Zielpunkt zubewegt haben. Dazu wurden die Antworten aus der Tabelle 4.5 die vier Antworten gewählt, bei denen die Manipulation durch das ASRDW bemerkt wurden. Für die Prüfung von H<sub>2</sub> wurde ein Binomialtest ausgewählt mit dem geprüft werden sollte ob  $H_2: p > 0,5$  und  $H_0: p \leq 0,5$  ist. 16 Proband\*innen bemerkten die Manipulationen im ASRDW-Szenario nicht, weshalb  $x=16$  war. Der Test auf Binomialverteilung mit  $P(X = 16)$  ergab  $p = 0.0046$  wodurch  $H_0$  abgelehnt wird. Das in dieser Arbeit verwendete ASRDW-Verfahren wird somit wahrscheinlich durchschnittlich nicht bemerkt, wenn die Nutzer\*innen sich nicht bewusst sind, dass dieses existiert beziehungsweise angewendet wird.

H<sub>3</sub>: Wie in der Tabelle 4.5 ersichtlich, wurde die optische Manipulation während des Blinking-Szenarios und Kombinationsszenarios nicht bemerkt. Aus den Angaben des Evaluationsfragebogens (im digitalen Anhang) gab die Probandin mit der ID=3 im Nachhinein an diese bemerkt zu haben, was sie jedoch während der Durchläufe nicht anmerkte. Die Angabe wurde damit als unklar bewertet, da sie im Zwischenfragebogen, direkt nach diesem Durchlauf angab nichts bemerkt zu haben.  $H_0$  wird damit abgelehnt, da die direkte Befragung nach diesem Durchlauf in dieser Arbeit höher gewichtet wird.

H<sub>4</sub>: Im Blinking-Szenario waren die Abweichungswerte geringer ( $Mdn = 0$ ) als die beim Szenario ohne Manipulationen ( $Mdn = 10$ ). Die Nullhypothese dazu wurde mit Hilfe des Mann-Whitney-U Tests geprüft. Das Ergebnis war statistisch nicht signifikant  $p = 0,718$ . Die Nullhypothese dazu wird damit beibehalten.

H<sub>5</sub>: Im Szenario ohne Manipulationen waren die Abweichungen geringer ( $Mdn = 10$ ) als beim Kombinationsszenario ( $Mdn = 235$ ). Die Nullhypothese dazu wurde mit dem Mann-Whitney-U Tests geprüft. Das Ergebnis war statistisch signifikant  $p = < 0,001$ . Die Nullhypothese wird damit abgelehnt. Damit ist es wahrscheinlich das auch das Kombinationsszenario zum RDW genutzt werden kann, was die Annahme wahrscheinlicher macht, dass ASRDW funktioniert, da das hier verwendete Blinking-Szenario mit einem Gain der sehr dicht bei subjektiver Gleichheit lag (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 6), allein keinen nachweislichen Einfluss auf die Abweichung der Proband\*innen hatte.

H<sub>6</sub>: Bei dieser Hypothese wurde davon ausgegangen das beim Kombinationsszenario höhere Abweichungswerte der Proband\*innen entstehen als bei dem ASRDW-Szenario. Dies ist in dieser Arbeit nicht mehr interpretierbar, da H<sub>4</sub> abgelehnt wurde. Mit einem ( $Mdn = 205$ ) hatte das akustische Verfahren in den Abweichungswerten einen niedrigeren Median als das Kombinationsszenario ( $Mdn = 235$ ). Die Nullhypothese wurde in diesem Falle mit einem MWU=  $p = 0,028$  abgelehnt, weshalb das Ergebnis statistisch signifikant war. Das reine Blinking-Szenario käme jedoch im Durchschnitt auf maximal 5 Blinzler, wenn man die Proband\*innen herausrechnet bei denen durch, das Verrutschen der Gesichtsmaske oder das Tragen einer Brille,

keine Blinzler vom Eye-Tracker in manchen Szenarien erkannt wurden. Dies waren insgesamt 6 Proband\*innen im Kombinationsszenario und im Blinking Szenario. Dies würde beim Kombinationsszenario maximal 6 Blinzler bedeuten, womit der Unterschied zwischen den Szenarien in Bezug auf ihre durchschnittliche, maximale Blinzleranzahl, bei 17% liegen würde. Die Werte dazu sind im digitalen Anhang beigefügt. Ob es dazu eine unbekannte, unabhängige Variable gibt, konnte in dieser Arbeit nicht ergründet werden. Dies könnte auf einen Fehler in der Implementation des Kombinationsszenarios hindeuten, einen nicht bedachten Lerneffekt oder ein Hinweis für weitere Forschung sein. Es wäre auch möglich, dass dieser Unterschied von einem Blinzler im Median diese +30cm Abweichung verursacht hat, dies lässt sich jedoch nicht mit den Ergebnissen begründen. Erwähnenswert ist dabei, dass in dem Kombinationsszenario durchweg positive Abweichungen stattgefunden haben mit einem Minimum von 80cm, was im Vergleich zu dem reinen ASRDW-Szenario mit 0cm im Minimum ein zu betrachtender Wert ist. Könnte dies repliziert werden, so käme bei dem Kombinationsszenario möglicherweise im Durchschnitt ein höheres Minimum zustande als beim reinen ASRDW.

H7: Mit einem deutlich niedrigeren Median beim Blinking-Szenario ( $Mdn = 0$ ) als im Kombinationsverfahren ( $Mdn = 235$ ), war das Ergebnis mit einem MWU mit  $p < 0,001$  statistisch signifikant, weshalb die Nullhypothese für H7 abgelehnt wurde.

H8: Beim Kombinationsszenario bemerkten 2 Proband\*innen die Manipulation, analog zu der Prüfung von H2 ergab dies nach demselben Test auf Binomialverteilung, nur das in diesem Falle  $x=18$  war, ein Ergebnis von  $p = 0,0001$  womit die Nullhypothese dazu abgelehnt wurde. Damit bemerkten die meisten Proband\*innen nicht, dass sie im Kombinationsszenario manipuliert worden sind. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass das Kombinationsszenario weiter betrachtet werden sollte.

Zusammengefasst wurden die Hypothesen zu den Forschungsfragen damit als wahrscheinlich zutreffend bestätigt oder abgelehnt. Das ASRDW funktioniert, wurde als wahrscheinlich bewertet und das es in Kombination mit weiteren Verfahren genauer betrachtet werden sollte, ist das Fazit für diese Ergebnisse.

## 5.2 BESONDERHEITEN UND BEZUG ZU BISHERIGEN ARBEITEN

Beim Vergleich der Ergebnisse der Total Scores der SSQ-Fragebögen (vgl. Kennedy et al., 1993, S. 203-220) in Tabelle 4.3 und Tabelle 4.10, wurde im Fragebogen nach dem Experiment ein niedrigerer Score berechnet. Dies bedeutet nicht, dass das Experiment den gesundheitlichen Zustand der Proband\*innen verbesserte. Bei einem niedrigeren SSQ-Score nach dem Experiment kann davon ausgegangen werden, dass der Versuch keine negativen Auswirkungen auf die gesundheitliche Kondition der Proband\*innen hatte (vgl. Bimberg, Weissker und Kulik, 2020, S. 466). Bei der Betrachtung der Geschwindigkeiten auf den Abbildungen 4.16 bis 4.19 zeigte sich, dass diese

bei den Szenarien mit ASRDW wie die anderen Szenarien bei 2,5m und 3m abfielen. Diese dabei jedoch bei Geschwindigkeit unter 0,7m/s in den nächsten 4 Metern bis zu mindestens 6,5m blieben. Damit ließe sich der Bereich eingrenzen in dem die Wassergeräusche die Proband\*innen vorsichtiger gehen ließen. Das dies auch in den anderen Szenarien beachtet wurde, könnte auf einen Lerneffekt hinweisen, dass in diesen Metern bereits in anderen Szenarien ins Wasser getreten worden ist oder dies in dem Szenario passierte. Der Abfall innerhalb der letzten Meter bis zum Zielpunkt könnte ebenfalls auf einen Lerneffekt zurückzuführen sein, da die Proband\*innen in jedem Szenario eine gleich lange Strecke durchlaufen mussten.

Bei dem reinen Blinking-Szenario wurde der PSE bei der Rotation um die Up-Achse von 0,495 von Langbehn (vgl. Langbehn et al., 2018, S. 7) in der Praxis damit bestätigt, da die Rotation in dieser Arbeit mit 0,6 knapp darüber lag und Proband\*innen statistisch nicht signifikant mehr von der Linie abwichen, obwohl sie beim Blinzeln rotiert wurden. Die Blinzler traten, wie in den Abbildungen 4.20 bis 4.23 zu sehen, zu Beginn jeder Simulation am häufigsten auf, hierbei kann dies entstanden sein, da kurz vorm Start der Weg ausgeblendet wurde, weshalb die Proband\*innen danach bei der Fokussierung des Hauses blinzeln. Dies lässt sich jedoch nicht genau bestimmen. Die Erkenntnis dazu wäre für eine höhere Abweichung relevant, da eine Rotation zu Beginn des Durchlaufes eine höhere potenzielle Abweichung ergibt als im späteren Verlauf.

Die Dauer der Szenarien lag bei  $M = 41,7$  Sekunden und die Anzahl der durchschnittlichen Blinzler in allen Szenarien übergreifend lag bei  $M = 4$  Blinzlern. Damit sind weniger Blinzler in diesem Experiment im Durchschnitt aufgetreten als die durchschnittliche Blinzelfrequenz von 13 pro Minute (vgl. Nguyen und Kunz, 2018, S. 5). Dies könnte einmal an der Methodik liegen wie diese Blinzler erkannt worden sind und ob diese erkannt worden sind und könnte sich gleichzeitig mit Ergebnissen von bisherigen Arbeiten begründen lassen, dass die Anzahl der Blinzler durch höhere Konzentration vermindert wurde (vgl. Kim et al., 2018, S. 412).

Zu den Abweichungen aus Abbildungen 4.24 und 4.27 der ASRDW-Szenarien fiel auf, dass das ASRDW-Szenario nach den ersten 2 Metern die Manipulation und die erwünschte Abweichung vom Pfad erzielte, dies jedoch in dem Kombinationsszenario bereits im ersten Meter passierte. Damit ließe sich möglicherweise die Ausgleichsbewegung durch das Blinking bestätigen, was jedoch durch die Ergebnisse der Hypothesen nicht gestützt werden kann.

Die Ergebnisse der Subskalen des IPQs (*igroup presence questionnaire 15.10.2020*) aus Tabelle 4.8 und der Abbildung 4.29 zeigten das der erlebte Realismus in der Simulation unterdurchschnittlich mit einer leicht negativen Tendenz bewertet wurde. Die Umgebung wurde grafisch nicht möglichst real gestaltet, weshalb dieser Wert damit zu begründen ist. Bei dem Gefühl, dort zu sein, erreichte die Simulation höhere Ergebnisse mit einer deutlich positiven Tendenz. Dies lässt sich mit der verwendeten Hardware begründen und damit das die Proband\*innen eine relativ große Bewegungsfreiheit in diesem Experiment hatten. Die weiteren Subskalen lagen nahe des Durchschnitts,

was insgesamt mit dem Gesamtergebnis zu einer neutralen Bewertung für diese Simulation interpretiert wurde. In Tabelle 4.6 und 4.7 sind die Abweichungen von Männern und Frauen beim ASRDW getrennt dargestellt. Die Männer-Gruppe hatte höhere Werte ( $Mdn = 230$ ) als die Frauen-Gruppe ( $Mdn = 100$ ). Die Nullhypothese, dass die Gruppe der Männer einen kleineren oder gleichen Median bei der Variable hat, wie die Gruppe der Frauen, wurde mit Hilfe eines Mann-Whitney-U Tests geprüft. Das Ergebnis war statistisch signifikant  $p = 0,028$ . Die dazu aufgestellte Nullhypothese wird damit abgelehnt. Dies bedeutet, dass die Männer signifikant mehr durch die akustischen Manipulationen beeinflusst worden sind, als die Frauen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Feigl und früheren Arbeiten (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2).

## AUSBLICK

---

Dieses Kapitel bildet den Abschluss dieser Arbeit und widmet sich zukünftigen Experimenten und Fragen, die in dieser Arbeit nicht geklärt werden konnten.

Das in dieser Arbeit verwendete Kombinationsverfahren bewirkte ungeklärte, positive Effekte auf das RDW, welche zukünftig genauer betrachtet werden könnten. Die Gains, DTS, PSE (vgl. Steinicke et al., 2010, S. 19-22) sind zu ASRDW noch unbekannt und müssen erst noch ergründet werden.

Da ASRDW mit einem Step Detector funktioniert, könnte geprüft werden, wie natürlich dieses Verfahren im Vergleich zu anderen RDW-Verfahren bewertet wird und wie gesundheitlich bekömmlich es im Vergleich zu diesen ist.

Wie bei der Arbeit von Feigl ist noch zu klären, welchen Einfluss unterschiedliche Arten von Klängen auf diese Art der akustischen Manipulation haben (vgl. Feigl et al., 2017, S. 2). Bei ASRDW wird das selbst erzeugte akustische Feedback genutzt, was jedoch abhängig von den Untergründen der virtuellen Umgebung ist. Der Unterschied beim Wechsel von einem Untergrund zu einem anderen, könnte unterschiedlich starke Effekte auf die Umleitung haben.

Die Beschaffenheit und das Material der Umgebung könnte damit verwendet werden, die Umleitung bei Bedarf zu erhöhen oder zu reduzieren. Dies ließe sich durch synthetisch erzeugte Schrittgeräusche wie von Turchet (vgl. Turchet et al., 2010, S. 270-272) möglicherweise selbst dann regulieren, wenn der Untergrund aus dem selben Material ist, aber das Schrittgeräusch sich darauf leicht verändert.

ASRDW ist damit noch ein unerforschtes Prinzip, das sich aus dem Vorwissen, der in diesem Experiment vorgestellten Arbeiten gebildet hat. Jede weitere Erkenntnis zu diesem Thema und Redirected Walking generell, sprengen die Gitter des beweglichen Vogelkäfigs, der metaphorisch für die Grenzen dieser wahrgenommenen Wirklichkeit steht.

Teil II

APPENDIX



## ANHANG

---

Der Anhang ist dieser Arbeit in digitaler Form beigefügt.

## LITERATUR

---

- Bimberg, Pauline, Tim Weissker und Alexander Kulik (2020). "On the usage of the simulator sickness questionnaire for virtual reality research". In: *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. IEEE, S. 464–467.
- Feigl, Tobias, Eliise Köre, Christopher Mutschler und Michael Philippsen (2017). "Acoustical Manipulation for Redirected Walking". In: *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Hrsg. von Morten Fjeld, Marco Fratarcangeli, Daniel Sjölie, Oliver Staadt und Jonas Unger. New York, NY, USA: ACM, S. 1–2. ISBN: 9781450355483. DOI: [10.1145/3139131.3141205](https://doi.org/10.1145/3139131.3141205).
- Fitzpatrick, Kay, Marcus A Brewer und Shawn Turner (2006). "Another look at pedestrian walking speed". In: *Transportation research record* 1982.1, S. 21–29.
- Hartmann, Jeremy, Christian Holz, Eyal Ofek und Andrew D. Wilson (2019). "RealityCheck". In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*. Hrsg. von Stephen Brewster, Geraldine Fitzpatrick, Anna Cox und Vassilis Kostakos. New York, New York, USA: ACM Press, S. 1–12. ISBN: 9781450359702. DOI: [10.1145/3290605.3300577](https://doi.org/10.1145/3290605.3300577).
- Kassner, Moritz, William Patera und Andreas Bulling (2014). "Pupil: An Open Source Platform for Pervasive Eye Tracking and Mobile Gaze-based Interaction". In: arXiv: [1405.0006 \[cs-cv\]](https://arxiv.org/abs/1405.0006). URL: <http://arxiv.org/abs/1405.0006>.
- Kennedy, Robert S, Norman E Lane, Kevin S Berbaum und Michael G Lilienthal (1993). "Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness". In: *The international journal of aviation psychology* 3.3, S. 203–220.
- Kim, Jihyun, Hrsg. (2020). *Technology and health: Promoting attitude and behavior change*. 1. Aufl. San Deigo: Elsevier. ISBN: 9780128169582.
- Kim, Jungho, Yadav Sunil Kumar, Jisang Yoo und Soonchul Kwon (2018). "Change of Blink Rate in Viewing Virtual Reality with HMD". In: *Symmetry* 10.9, S. 400. DOI: [10.3390/sym10090400](https://doi.org/10.3390/sym10090400).
- L. Kruse, E. Langbehn und F. Steinicke (2018). "I Can See on My Feet While Walking: Sensitivity to Translation Gains with Visible Feet". In: *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, S. 305–312.
- Langbehn, Eike, Frank Steinicke, Markus Lappe, Gregory F. Welch und Gerd Bruder (2018). "In the blink of an eye: leveraging blink-induced suppression for imperceptible position and orientation redirection in virtual reality". In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 37.4, S. 1–11.



- Lo, W. T. und Richard H.Y. So (2001). "Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes". In: *Applied Ergonomics* 32.1, S. 1–14. ISSN: 00036870. DOI: [10.1016/S0003-6870\(00\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00059-4).
- Meyer, Florian, Malte Nogalski und Wolfgang Fohl (2016). "Detection thresholds in audio-visual redirected walking". In: *Proc. Sound and Music Comp. Conf.(SMC)*. Bd. 16, S. 17–27.
- Nguyen, Anh und Andreas Kunz (2018). "Discrete scene rotation during blinks and its effect on redirected walking algorithms". In: *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Hrsg. von Stephen N. Spencer, Shigeo Morishima, Yuichi Itoh, Takaaki Shiratori, Yonghao Yue und Rob Lindeman. New York, NY, USA: ACM, S. 1–10. ISBN: 9781450360869. DOI: [10.1145/3281505.3281515](https://doi.org/10.1145/3281505.3281515).
- Nilsson, Niels Christian, Tabitha Peck, Gerd Bruder, Eri Hodgson, Stefania Serafin, Mary Whitton, Frank Steinicke und Evan Suma Rosenberg (2018). "15 years of research on redirected walking in immersive virtual environments". In: *IEEE computer graphics and applications* 38.2, S. 44–56.
- Olshannikova, Ekaterina, Aleksandr Ometov, Yevgeni Koucheryavy und Thomas Olsson (2015). "Visualizing Big Data with augmented and virtual reality: challenges and research agenda". In: *Journal of Big Data* 2.1. DOI: [10.1186/s40537-015-0031-2](https://doi.org/10.1186/s40537-015-0031-2).
- Peck, Tabitha C., Henry Fuchs und Mary C. Whitton (2010). "Improved redirection with distractors: A large-scale-real-walking locomotion interface and its effect on navigation in virtual environments". In: *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, S. 35–38.
- Razzaque, Sharif, Zachariah Kohn und Mary C. Whitton (2001). "Redirected Walking". In: *Eurographics 2001 - Short Presentations*. Eurographics Association, S. 105–108. DOI: [10.2312/egs.20011036](https://doi.org/10.2312/egs.20011036).
- (2005). *Redirected walking*. Citeseer.
- Rensink, Ronald A., J. Kevin O'Regan und James J. Clark (1997). "To see or not to see: The need for attention to perceive changes in scenes". In: *Psychological science* 8.5, S. 368–373.
- Schwind, Valentin, Pascal Knierim, Nico Haas und Niels Henze (2019). "Using Presence Questionnaires in Virtual Reality". In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*. Hrsg. von Stephen Brewster, Geraldine Fitzpatrick, Anna Cox und Vassilis Kostakos. New York, New York, USA: ACM Press, S. 1–12. ISBN: 9781450359702. DOI: [10.1145/3290605.3300590](https://doi.org/10.1145/3290605.3300590).
- Serafin, Stefania, Niels C. Nilsson, Erik Sikstrom, Amalia de Goetzen und Rolf Nordahl (2013). "Estimation of detection thresholds for acoustic based redirected walking techniques". In: *2013 IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 161–162.
- Simons, Daniel J. (2000). "Current approaches to change blindness". In: *Visual cognition* 7.1-3, S. 1–15.
- Sindelar, Christoph M (2018). "Waving Reality Goodbye-Flieht eine Generation in eine alternative Welt oder schöpft sie dort die notwendige Kraft

- für Veränderungen?" In: *Zeitschrift für freie psychoanalytische Forschung und Individualpsychologie* 2, S. 5–20.
- Sony (18.10.2020). *Sony Kabellose Kopfhörer mit Noise Cancelling WH-1000XM3*. URL: <https://www.sony.de/electronics/kopfband-kopfoerer/wh-1000xm3/specifications>.
- Stanney, Kay M., Robert S. Kennedy und Julie M. Drexler (1997). "Cybersickness is not simulator sickness". In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society annual meeting*. Bd. 41, S. 1138–1142.
- Steinicke, Frank, Gerd Bruder, Klaus Hinrichs, Jason Jerald, Harald Frenz und Markus Lappe (2009). "Real Walking through Virtual Environments by Redirection Techniques". In: *JVRB - Journal of Virtual Reality and Broadcasting* 6(2009).2. ISSN: 1860-2037. DOI: [10.20385/1860-2037/6.2009.2](https://doi.org/10.20385/1860-2037/6.2009.2). URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-6-17472>.
- Steinicke, Frank, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz und Markus Lappe (2008). "Analyses of human sensitivity to redirected walking". In: S. 149–156. DOI: [10.1145/1450579.1450611](https://doi.org/10.1145/1450579.1450611).
- (2010). "Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques". In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 16.1, S. 17–27. ISSN: 1941-0506. DOI: [10.1109/TVCG.2009.62](https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.62).
- Turchet, Luca, Rolf Nordahl, Stefania Serafin, Amir Berrezag, Smilen Dimitrov und Vincent Hayward (2010). "Audio-haptic physically-based simulation of walking on different grounds". In: *2010 IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing*. IEEE, S. 269–273. ISBN: 978-1-4244-8110-1. DOI: [10.1109/MMSP.2010.5662031](https://doi.org/10.1109/MMSP.2010.5662031).
- Usoh, Martin, Kevin Arthur, Mary C. Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater und Frederick P. Brooks (1999). "Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments". In: *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99*. Hrsg. von Warren Waggenspack. New York, New York, USA: ACM Press, S. 359–364. ISBN: 0201485605. DOI: [10.1145/311535.311589](https://doi.org/10.1145/311535.311589).
- VIVE Cosmos - Technische Daten | VIVE™ (10.10.2020). URL: <https://www.vive.com/de/product/vive-cosmos/specs/>.
- igroup presence questionnaire (15.10.2020). URL: <http://www.igroup.org/pq/ipq/download.php>.