

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Informatik

Masterarbeit



Entwicklung einer Virtual Reality Trainingsanwendung zur
kognitiven Rehabilitation von Neglect-Patienten mittels
Eye-Tracking

Erstprüfer: Prof. Dr. Bernhard Preim
Zweitprüfer: Prof. Dr. Christian Hansen
Betreuer: Dr. Sebastian Wagner

eingereicht: 31. Mai 2023

von: Jorik Jakober
geboren am 06. Januar 1996
in Göttingen

Kurzreferat

Der visuelle Neglect bezeichnet eine Aufmerksamkeitsstörung, die sich in einer Vernachlässigung des kontraläsionalen Wahrnehmungsfeldes äußert und das alltägliche Leben beeinträchtigt. Bei einem linksseitigen Neglect werden je nach Ausprägung vereinzelte Gegenstände im linken Gesichtsfeld oder das gesamte linke Gesichtsfeld vernachlässigt. Für die Rehabilitation ist es wichtig, wirksame Behandlungsmethoden zu entwickeln, die zu einer kognitiven Verbesserung des Neglects führen.

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Virtual Reality (VR) Trainingsanwendung zur kognitiven Rehabilitation von Patienten mit einem visuellen linksseitigen Neglect zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurden das visuelle Suchtraining und die optokinetische Stimulation (OKS) in die virtuelle Realität implementiert. Um zu zeigen, wie eine VR-Trainingsanwendung zur Unterstützung der Behandlung gestaltet werden kann, wurde der iterative Entwicklungsprozess mit dem klinischen Partner beschrieben. Neben dem Beleg der Machbarkeit war es das Ziel herauszufinden, ob Patienten das VR-Training eigenständig und ohne das Auftreten von Nebenwirkungen durchführen können. Zum Ende des Entwicklungsprozesses wurde das VR-Training von fünf Experten des Universitätsklinikums Leipzig (UKL) getestet und evaluiert. Geäußerte Verbesserungsvorschläge flossen zum Großteil in den Entwicklungsprozess mit ein, während Stärken und Schwächen Teil der Ergebnisse waren.

In einer Studie nahmen sieben Teilnehmer ohne Neglect und drei Teilnehmer mit Neglect teil. Die Usability wurde mit dem *User Satisfaction Evaluation Questionnaire* (USEQ) bewertet und ergab für beide Gruppen sehr hohe Ergebnisse. Das Auftreten von Cybersickness wurde mit dem *Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire* (CSQ-VR) für beide Gruppen vor (Prä) und nach (Post) dem VR-Training erfasst. Die Ergebnisse zeigten, dass durch das VR-Training leichte Nebenwirkungen auftreten. Bei beiden Gruppen traten Symptome vor und nach dem VR-Training in vergleichbarer Höhe auf, wobei das Training zu einem leichten Anstieg der Symptomintensitäten (CSQ-VR Score) führte. Die Studie hat gezeigt, dass die Teilnehmer in der Lage waren, das Training eigenständig und ohne zusätzliche Hilfestellung durchzuführen. Aufgrund der geringen Patientenzahl können die Ergebnisse der Studie bisher als Indikator interpretiert werden. In Zukunft werden Studien mit einer größeren Patientenzahl benötigt, um die Ergebnisse der Arbeit zu verifizieren und die Wirksamkeit des VR-Trainings zu evaluieren.

Abstract

Unilateral Spatial Neglect (USN) is an attention deficit disorder that manifests as a neglect of the contralesional perceptual field and can negatively affect the patient's daily life. Depending on the severity of the left-sided USN, single objects in the left visual field of view or the entire left visual field of view may be neglected. For rehabilitation, it is important to provide effective interventions that improve the cognitive deficits.

The goal of this work was to develop a virtual reality (VR) training application to support the cognitive rehabilitation of patients with a left-sided USN. For this purpose, a visual scanning training and optokinetic stimulation were implemented into virtual reality. To demonstrate how a VR training application can be designed to support with treatment, the collaborative development process with the clinical partner was described. Besides the proof-of-concept, the goal was to determine whether patients were capable of performing the VR training independently and without side effects. At the end of the development process, five experts from Leipzig University Hospital tested and evaluated the VR training application. Suggestions for improvement were largely incorporated into the development process, while strengths and weaknesses were part of the results.

For the evaluation, a study was conducted with seven healthy participants and three USN-patients. The *user satisfaction evaluation questionnaire* (USEQ) was utilized to assess usability, achieving highly scores for both groups. The occurrence of cybersickness was assessed with the *Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire* (CSQ-VR), with both groups completing the questionnaire before (pre) and after (post) the VR training. Both groups experienced similar levels of symptoms before and after VR training. Furthermore, the training led to a slight increase in symptom intensities (CSQ-VR Score). The results showed that mild side effects occurred as a result of the VR training. The study showed that the patients and healthy participants were able to perform the training independently. Due to the small number of patients, the results of the study can only be interpreted as indicative. Further studies with a larger number of patients are needed to confirm the results of this work and evaluate the effectiveness of the VR training application for rehabilitation.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

Gender-Disclaimer

In der Abschlussarbeit wird aufgrund der besseren Lesbarkeit lediglich das generische Maskulin verwendet werden. Die Sprachform schließt explizit die weibliche sowie andere Geschlechtsidentitäten mit ein.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Beitrag	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Medizinischer Hintergrund	4
2.1.1	Sinneswahrnehmung	4
2.1.2	Schlaganfall	6
2.1.3	Visueller Neglect	6
2.2	Technischer Hintergrund	9
2.2.1	Immersion, Interaktion und Imagination	9
2.2.2	Aufbau eines VR-Systems	10
2.2.3	Interaktionsarten	12
2.2.4	Cybersickness	14
2.2.5	Eye-Tracking	15
3	Verwandte Arbeiten zur VR-gestützten Rehabilitation	18
3.1	Visuelles Suchtraining	18
3.2	Hilfestellungen und alltägliche Aktivitäten	20
4	Konzept	23
4.1	Interaktion	24
4.2	Trainingsystem	24
4.3	VR-Umgebungen	28
4.4	Hilfestellungen	29
4.5	Datenerfassung	30
4.6	Therapeutenoberfläche	30
5	Implementierung	33
5.1	Software	34
5.1.1	Unity	34
5.1.2	Konstruktionssoftware	34
5.1.3	Software Development Kit	34
5.2	Hardware	35

5.3	VR-Umgebungen	35
5.3.1	Trainingsszene	35
5.3.2	Pausenszene	40
5.4	Trainingssystem	46
5.4.1	Trainingskonzept	46
5.4.2	Trainingslevel	49
5.4.3	Tutorials	55
5.5	Hilfestellungen	60
5.5.1	1. Hilfstool (Kopfhaltedefeedback)	60
5.5.2	2. Hilfstool (kontraläsionaler Hinweis)	66
5.6	Datenerfassung	67
5.7	Therapeutenoberfläche	69
6	Evaluation	73
6.1	Fragebögen	73
6.1.1	Expertenfragebogen	73
6.1.2	Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire	73
6.1.3	User Satisfaction Evaluation Questionnaire	74
6.2	Ergebnisse	75
6.2.1	Expertenfragebogen	75
6.2.2	Studienergebnisse	81
6.2.3	Diskussion	85
7	Abschluss	89
7.1	Zusammenfassung	89
7.2	Ausblick	90
	Literaturverzeichnis	92
A	Anhang	97

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
CAD	computer aided design
CSQ-VR	Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire
ET	Eye-Tracking
FoV	field of view
G20M	Tobii Gaze-2-Object-Mapping
HMD	Head-Mounted Display
IPD	Interpupillary distance
MoCa	Montreal Cognitive Assessment
OKS	optokinetische Stimulation
PA	Prismenadaption
POR	Point Of Regard
RCT	randomised controlled trial
SDK	Software Development Kit
TE	Trainingseinheit
UKL	Universitätsklinikums Leipzig
USEQ	User Satisfaction Evaluation Questionnaire
USN	unilateral spatial neglect
VR	Virtual Reality
VU	virtuelle Umgebung

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anatomie des Auges	5
2.2	Das Explorationstraining von Fruhmann-Berger et al. illustriert das asymmetrische Suchverhalten des USN zur ipsiläsionalen Seite (rechts). Die Suchlinien zeigen als Kombination von Augen- und Kopforientierung das aktive Suchverhalten (schwarz) und in Ruhe ("tue nichts", grau). Die Achsenbeschriftung stellt den Sichtbereich von 240 ° x 80 ° dar.	7
2.3	Die Kopieraufgabe von Kortte et al. illustriert den Unterschied des egozentrischen und allozentrischen Neglects	8
2.4	HTC Vive Pro Eye	11
2.5	Die systematische Übersichtsarbeit von Boletsis et al. basiert auf 42 wissenschaftlichen Publikationen und illustriert die Typologie der Fortbewegungstechniken in der VR.	13
2.6	Invasive Eyetracking Verfahren	15
2.7	Zeigt das bessere Kontrastverhältnis der aktiven Infrarotlicht-Bestrahlung (b) im Vergleich zur passiven Bestrahlung (a) durch Umgebungslicht (Aus: [16]). Weiterhin wird die relative Position der Pupille (schwarz) und das erste Punkinje Bild (weiß) bei einer ET-Kalibrierung mit neun-Punkten visualisiert (Aus: [33]).	16
3.1	Stellt das VR-System zum Training im peripersonalen (Objekte greifen) und extrapersonalen (visuell blinkende Objekte benennen) Raumbereich dar. Gezeigt wird der Aufbau des VR-Raumes (b) und ein schwarzer Vorhang um die Aufmerksamkeit nach links zu lenken.	19
3.2	Stellt die Reproduktion eines Weges durch eine nordamerikanische Stadt zum Training des räumlichen Gedächtnisses dar. Die VR-Anwendung VIRTUE ermöglicht das Training von Alltagstätigkeiten in patientengerechten VR-Umgebungen.	20
4.1	Die Hervorhebungsarten der Farbgebung werden durch die Verwendung eines Assets an exemplarischen Alltagsgeometrien visualisiert.	27
4.2	Illustration der bemaßten Skizzen zur Trainingsszene (Fabrikhalle und Trainingsraum) und Pausenszene (Pausenraum) in der Draufsicht	29

5.1	Exemplarische Darstellung von drei modellierten Fließbandgeometrien. Neben einem langen (4140mm x 1080mm x 840mm) und einem kurzen (4140mm x 1080mm x 1640mm) ebenen Fließband wird ein Fließband mit Steigung (30°) zum Transport auf das höhere Fließband dargestellt. Alle Bemaßungen sind in Millimetern angegeben.	36
5.2	Darstellung der Nutzeransicht für die angepasste Umgebung in Anlehnung an einen Wohnbereich.	38
5.3	Darstellung der Trainingsszene in der Draufsicht und der Perspektive des Nutzers. Durch Icons wird die Position des Nutzers (Kameraicon) und einer virtuellen Tür (Türicon) visualisiert.	39
5.4	Gestaltung des virtuellen Trainingsraumes mit der abgegrenzten Nutzerposition, den Fließbandelementen und Postern im Hintergrund.	39
5.5	Raumanordnung der Basisstationen für das SteamVR-Tracking der HTC Vive Pro Eye in der Single und Multi-User Variante	40
5.6	Darstellung der Kameraperspektive mit Ausblick auf vorbeifliegende Vögel als OKS-Objekte und ein Gebirge im Hintergrund.	41
5.7	Darstellung des 2. Entwicklungsansatzes zur OKS mit fliegenden Luftballons.	41
5.8	Basierend auf der Idee von Yasuda et al. wurde ein bewegter Vorhang entwickelt, um die Aufmerksamkeit des Patienten von rechts nach links zu lenken. Illustriert wird die Bewegung im Raum und vor dem Sichtfeld (Kamera) des Nutzers. Mit der etappenweisen Vorhangbewegung nach rechts (Verdeckung linke Seite) und der anschließenden gleichzeitigen Bewegung nach links, wanderte ein sichtbarer Bereich von rechts nach links.	42
5.9	Darstellung des 3. Entwicklungsansatzes zur OKS mit fliegenden Luftballons aus der Draufsicht (a) und Flugzeuggeometrien aus der Nutzerperspektive.	43
5.10	Gezeigt wird die konvexe Flugbahn der OKS-Objekte in der Pausenszene. Die Objektbewegung wird in der Draufsicht und in der Außenansicht auf die Szene dargestellt.	45
5.11	Ansicht des Nutzers in der Pausenszene bei der Beobachtung von Luftballons auf einer konvexen Flugbahn. Zu sehen ist, wie die OKS-Objekte hinter einer Hecke und Bäumen verschwinden, bevor sie ausgeblendet werden.	46
5.12	Das Bild stellt exemplarisch die HMD-Ansichten als Kombination der Parameter Kameraabstand (Entfernung) und Objektgröße (Scale) als Übersicht dar. Für die Visualisierung wurden sieben Fließbandobjekte auf einem geradlinigen Fließband positioniert.	47
5.13	Die Anwenderoberfläche des Prototyps der Version 1.6 stellt exemplarisch eine Kameraentfernung von 4m und eine Objektgröße von 2 dar.	48
5.14	Trainingslevel eins aus der Ansicht des Nutzers.	50
5.15	Darstellung der finalen Gestaltung der Trainingslevel eins bis drei.	50

5.16	Darstellung der finalen Gestaltung der Trainingslevel vier bis sechs.	51
5.17	Darstellung der Problematik zur ET-Selektionsmethode. Die Genauigkeit der Selektion nahm für dicht beieinanderstehende oder sich verdeckende Objekte ab.	53
5.18	Gezeigt wird der finale Aufbau des Trainingslevels sechs in der Draufsicht. Die Bemaßung stellt den Abstand von der Nutzerposition zur Fließbandmitte der drei Fließbänder dar.	54
5.19	Schematische Visualisierung des Beförderungsprinzips.	55
5.20	Darstellung einer interaktiven Aufgabe und eines Belohnungseffektes im Tutorial 1. Nachdem der Nutzer nacheinander drei Objekte verfolgt und bestätigt hatte, wurden Belohnungseffekte abgespielt.	57
5.21	Exemplarische Darstellung der Trainingsperformance auf einem Monitor. Für jeden Transport eines Trainingslevels ist die Trainingszeit und Anzahl der Zielobjekte sowie die Anzahl und Zeitdauer der Kopfrotation nach links und rechts dargestellt.	58
5.22	Als 1. Konzept des 1. Hilfstools wurde eine geometrische Kugel mit eingefärbten Teiloberflächen als eine Art Guckloch erstellt. Bei einer Abweichung des Kopfes von der Neutralstellung sollte der Nutzer ein visuelles Feedback erhalten.	60
5.23	Das 2. Konzept des 1. Hilfstools bot dem Nutzer ein interaktives visuelles Feedback. Sobald der Nutzer mit der horizontalen Drehung des Kopfes von einem neutralen Bereich abwich, wurde das Sichtfeld seitlich mit dem Grad der Drehung ausgeblendet. Illustriert wird der transparente Übergang hin zur Intransparenz bei einer Kopfdrehung nach rechts.	61
5.24	Das 3. Konzept des 1. Hilfstools bot ein interaktives visuelles Feedback mit der Abdunkelung des gesamten Sichtfeldes. Illustriert wird der Start der Abdunkelung mit einem transparenten Übergang zur Intransparenz bei einer Kopfdrehung nach rechts.	62
5.25	Die Bedienelemente der Benutzeroberfläche des Prototyps 1.5 um geeignete Parameterwerte für das 1. Hilfstool zu definieren. Über (anwenderfreundliche) Schieberegler konnte der klinische Partner Varianten des Features testen.	63
5.26	Darstellung des Kopfhaltedefeedbacks (1. Hilfstool) bei einer Kopfdrehung nach links. Gezeigt wird der Ausgangswert der Transparenz, die maximale Transparenz, die Hilfestellung sowie die Bestätigung der Kopfstellung mit dem kreisrunden Ladekreis.	65

5.27	Darstellung der 2. Hilfestellung zur Lokalisation des Zielobjektes oder ET-Displaybuttons. Durch das grün blinkende Hervorheben erhielt der Patient einen visuellen Hinweis. Zur Lokalisation des Displaybuttons wurde zusätzlich ein grüner Pfeil eingeblendet, der den Weg zum Button wies. . . .	66
5.28	Darstellung der finalen Therapeutenoberfläche zur Bedienung der VR-Trainingsanwendung. Neben den Bedienelementen konnte der Therapeut die HMD-Ansicht des Patienten im Baisisraum betrachten.	69
5.29	Darstellung des Szenenwechsels zum Vorbeugen von Cybersickness. Mit der Anzeige eines Hinweistextes und Countdowns wurde das Sichtfeld hin zur Intransparenz abgedunkelt und in der neuen bzw. veränderten VU wieder aufgeklärt.	70
5.30	Darstellung der Therapeutenoberfläche in der Trainingsszene bei der Fokussierung des Zielobjektes.	71
5.31	Darstellung der Therapeutenoberfläche in der Pausenszene.	71
6.1	Zeigt den Mittelwert beider Gruppen für die Fragen eins bis sechs in Blau und Orange. Als Fehlerindikator wird die Standardabweichung (SD) angegeben.	83
6.2	Zeigt den Mittelwert beider Gruppen für die Fragen eins bis fünf in Blau und Orange. Als Fehlerindikator wird die Standardabweichung (SD) angegeben.	83
6.3	Stellt den Mittelwert als Differenz (Diff) der Ergebnisse vor (Prä) und (Post) nach dem VR-Training für die kategorischen Ergebnisse und das Gesamtergebnis (CSQ-VR-Score Diff) dar.	84
A.1	Follow-up-Befragung: Lebensumstände von Schlaganfallpatienten sechs Monate nach dem Akutereignis	97
A.2	Raumanordnung der Basisstationen für das SteamVR-Tracking der HTC Vive Pro Eye in der Single und Multi-User Variante	98
A.3	Das G20M basiert auf einem Machine Learning Algorithmus und verspricht im Vergleich zum Standard Raycast-Verfahren eine robustere ET-Selektionsmethode. Tobii AB visualisiert die Problematik der ET-Selektion. Obwohl der Nutzer auf das Objekt schaut, kommt es durch Faktoren zu einer Abweichung des Blickstrahles. Während die originale Kollidergröße (Objektgröße) keine und die doppelte Kollidergröße zu viele Kollisionen erkennt, zeigt das G20M die besten Ergebnisse.	99
A.4	Die grundlegende Fließbandgeometrie setzte sich aus drei modellierten Bauteilen zusammen. Dargestellt sind das Band (Breite 1000mm und Länge 4000mm), der Stift (Länge 1000mm, ohne Fortsatz) und das Tischgestell (Breite 1080mm und Länge 4000mm) mit der Bemaßung in Millimetern. .	100
A.5	Expertenfrageboen - Seite 1/3	101
A.6	Expertenfrageboen - Seite 2/3	102

A.7 Expertenfrageboen - Seite 3/3	103
A.8 Prä-Fragebogen zur Bewertung von Virtual Reality induzierten Symptomen und Effekten - Seite 1/2	104
A.9 Prä-Fragebogen zur Bewertung von Virtual Reality induzierten Symptomen und Effekten - Seite 2/2	105
A.10 Fragebogen zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von virtuellen Reha- bilitationssystemen	106
A.11 User Satisfaction Evaluation Questionnaire	107

Tabellenverzeichnis

4.1	Auflistung der gesammelten Schwierigkeitsparameter zur Konzeptionierung von Trainingsleveln.	26
4.2	Darstellung der Ideen für die Objekthervorhebung bei Blickkontakt.	27
5.1	Listet die Merkmale der finalen Trainingslevels auf.	52
5.2	Zeigt die Auswahl geeigneter Parameterwerte des 1. Hilfstools.	64
5.3	Auflistung der Programmodi für die Dokumentation der Einträge in den Log-Dateien.	68
6.1	Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 1-2 des Expertenfragebogens.	76
6.2	Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 3-4 des Expertenfragebogens.	77
6.3	Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 5-6 des Expertenfragebogens.	78
6.4	Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 7-8 des Expertenfragebogens.	79
6.5	Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 9-10 des Expertenfragebogens.	80
6.6	Die Tabelle stellt die Ergebnisse der Studie als deskriptive Statistik dar. Neben dem Alter der Teilnehmer und den Scores des USEQ werden die kategorisierten Scores des CSQ-VR vor (Prä), nach (Post) und als Vergleich (Diff) dargestellt. Positive Werte stellen einen Anstieg und negative einen Abfall des Scores nach der Intervention dar.	82

1 Einleitung

Die Anfänge der virtuellen Realität (VR) reichen bis zum Jahr 1962 zurück, als Morton Heilig ein Patent für sein VR-System zur Darstellung dreidimensionaler Videos einreichte. Schon damals sprach das System mit Sound-, Aroma-, Wind- und Vibrationseffekten mehrere Sinne an [1].

Geplagt von zu hohen Erwartungen und teurer Hardware, gewinnt die VR in den letzten Jahren erneut an Bedeutung. Durch erschwinglichere VR-Brillen und stetig verbesserte Rechenleistung erhält die Technologie Einzug in den Verbrauchermarkt. Neben der Unterhaltungsbranche ist die VR zu einem wichtigen Instrument verschiedener Industriebereiche geworden. Im Vordergrund stehen Planung [2–4] und Schulung [5, 6]. Im Bereich der Medizin ermöglicht VR das Training von chirurgischen Eingriffen [7, 8]. Ein weiteres Anwendungsfeld, die virtuelle Rehabilitation setzt VR als therapeutisches Medium ein um eine Verbesserung kognitiver Erkrankungen zu erzielen [9]. In dieser Arbeit wird eine VR-Trainingsanwendung zur Rehabilitation von Neglect-Patienten entwickelt (USN, *unilateral spatial neglect*).

Der Schlaganfall (Insult) ist die häufigste Erkrankung in Deutschland, die in einer bleibenden Behinderung resultiert.¹ Wird ein Blutgefäß im Gehirn verengt, blockiert oder platzt, ist die kontinuierliche Versorgung des Gehirns gestört oder unterbrochen (Hirnfarkt). Eine darauffolgende Hirnläsion äußert sich nach Ausprägung in körperlichen und kognitiven Einschränkungen des alltäglichen Lebens, die zu einer verminderten Lebensqualität führen können. Der visuelle Neglect tritt bei 25-30% der Schlaganfallpatienten auf. Die Folge ist eine eingeschränkte visuelle Wahrnehmung, wodurch in schweren Fällen lediglich die Hälfte des Gesichtsfeldes wahrgenommen wird [10, 11].²

Das primäre Ziel der Rehabilitation ist die Wiedereingliederung ins alltägliche Leben (optimale Teilhabe). Die Umsetzung therapeutischer Verfahren mit etablierten, traditionellen Methoden ist limitiert. Häufig fehlt ein Bezug zum Alltag oder einem realen Kontext, die Motivation für repetitive Wiederholungen, eine motorische Datenerfassung sowie die Beteiligung des extrapersonalen Raumes, sodass es zum heutigen Stand keine Goldstandard-Intervention gibt [12]. Die Einweisung und Durchführung der Rehabilitation

1: Eine Follow-up-Befragung von Schlaganfallpatienten (Abb. A.1) nach einer Entlassung aus stationärer Rehabilitation verdeutlicht die Einschränkungen und den Bedarf effektiver Therapieverfahren.

2: National Institute of Neurological Disorders and Stroke (NINDS), National Institutes of Health (NIH), <https://www.ninds.nih.gov/health-information/disorders/stroke?search-term=stroke>.

von Neglect-Patienten benötigt eine dauerhafte therapeutische Betreuung, die sich in hohen Kosten widerspiegelt und ein protokolliertes *Hometraining*³ verhindert [9, 10].

Der Einsatz von VR wird in der USN-Rehabilitation als neuartiges und fortschrittliches Instrument betrachtet, das sich in Zukunft zu einer wirksamen Behandlungsmethode entwickeln könnte [11, 13]. Von Vorteil sind die realitätsnahe Simulation alltäglicher Situationen durch das Zusammenspiel von Immersion und Mensch-Computer-Interaktion, eine sichere Patientenumgebung sowie die Erfassung relevanter Patientendaten in Echtzeit. Eyetracker ermöglichen es die Aufmerksamkeitsleistung aus psychologischen und neurologischen Gesichtspunkten zu quantifizieren [9, 11, 14, 15].

1.1 Beitrag

In dieser Arbeit wird eine VR-Trainingsanwendung zur kognitiven Rehabilitation von Patienten mit einem visuellen Neglect entwickelt. Hierfür ist es das Ziel, das visuelle Suchtraining und die optokinetische Stimulation (OKS) (*gemischter Ansatz*) in die VR zu implementieren. Die Umsetzung eines gemischten Behandlungsansatzes spiegelt sich in realen Umgebungen in einem hohen Mehraufwand und finanziellen Kosten wider. Eine Implementierung in VR ermöglicht es, eine patientengerechte Trainingsumgebung bereitzustellen und darüber hinaus quantifizierbare Patientendaten in Echtzeit zu erfassen.

Die Implementierung der VR-Trainingsanwendung erfolgte in Absprache mit neuropsychologischen Experten des Universitätsklinikum Leipzig (UKL). Neben der prinzipiellen Machbarkeit des Vorhabens (*Proof-of-Concept*) war es das Ziel herauszufinden, ob die Anwendung ohne das Auftreten von Nebenwirkungen verwendet werden kann. Eine nachfolgende Studie des UKL sollte herausfinden, inwieweit das VR-Training zu einer kognitiven Verbesserung des visuellen Neglects führt.

Forschungsfrage 1: Wie kann ein VR-Trainingssystem zur Unterstützung eines Behandlungsansatzes mit visuellen Suchtraining und optokinetischer Stimulation gestaltet werden?

Forschungsfrage 2: Sind Patienten in der Lage, das VR-Training eigenständig und ohne das Auftreten von Nebenwirkungen durchzuführen?

3: Für Patienten in ländlichen Gebieten entstehen in Folge einer medizinischen Unterversorgung oft hohe Fahrtkosten. Laut der National Rural Health Association survey verteilen sich auf 50 Mio. Amerikaner in ländlichen Gebieten lediglich zehn % aller Ärzte [9].

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Folgenden wird der Aufbau der Arbeit erläutert.

Kapitel 2 - Theoretische Grundlagen

Das Kapitel vermittelt dem Leser die medizinischen und technischen Hintergründe zum Verständnis der Arbeit. Im medizinischen Teil liegt der Fokus neben dem visuellen Sehen und der Oklomotorik des Auges auf dem visuellen Neglect. Im technischen Teil werden die grundlegende Terminologie, technologische Verfahren, Interaktionstechniken der VR und das Auftreten von Cybersickness beschrieben.

Kapitel 3 - Verwandte Arbeiten zur VR-gestützten Rehabilitation

Beschreibt relevante wissenschaftliche Veröffentlichungen im Bereich der VR-gestützten Rehabilitation des visuellen Neglects. Neben den Studienergebnissen wird erläutert, wie die therapeutischen Verfahren als Training in die VR implementiert wurden.

Kapitel 4 - Konzept

Beschreibt die Konzeptionierung mit dem anfänglichen Entscheidungsprozess und Ursprung zur Definition der Anforderungen.

Kapitel 5 - Implementierung

Beschreibt die Umsetzung der Anforderungen in Kooperation mit dem klinischen Partner. Neben prototypischen Entwicklungsansätzen werden Ideen, iterative Bewertungen, getroffene Entscheidungen und gewonnene Erkenntnisse beschrieben.

Kapitel 6 - Evaluation

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben. Die Ergebnisse der Studie und der qualitativen Evaluation durch die Experten des UKL werden erläutert und im Anschluss diskutiert.

Kapitel 7 - Abschluss

Das letzte Kapitel fasst wichtige Inhalte und Ergebnisse der Arbeit zusammen und nimmt Bezug auf die Forschungsfragen. Weiterhin wird der Bedarf zukünftiger Forschung aufgezeigt und potenzielle Weiterentwicklungen zur Verbesserung VR-Trainingssystems erläutert.

2 Theoretische Grundlagen

In dem theoretischen Teil erhält der Leser einen Überblick über die medizinischen und technischen Hintergründe. Angefangen mit den medizinischen Grundlagen werden die visuelle Sinnesverarbeitung, der Schlaganfall sowie der visuelle Neglect und ihre medizinische Relevanz erläutert. Im technischen Teil erfolgt die Einführung in die grundlegende Terminologie der Immersion, Interaktion und Imagination und den Aufbau eines VR-Systems. Die Interaktionsarten und das Prinzip des Eye-Trackings geben eine Vorstellung über die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (Human-Computer-Interaction). Mit dem Thema Cybersickness wird die Ursache und das Auftreten üblicher Symptomaten in computergenerierten Umgebungen erklärt.

2.1 Medizinischer Hintergrund

2.1.1 Sinneswahrnehmung

Die Wahrnehmung einer virtuellen Umgebung basiert auf der menschlichen Informationsverarbeitung. Der Körper besitzt mit der visuellen (Sehen), akustischen (Hören), vestibulären (Gleichgewichtssinn), haptischen (Fühlen), gustatorischen (Schmecken) und olfaktorischen Wahrnehmung (Riechen) sechs Wahrnehmungsarten. Für einen hohen Immersionsgrad stimuliert ein VR-System typischerweise mehrere Sinneswahrnehmungen (Multimodale Stimulation), von denen die visuelle Wahrnehmung die größte Bedeutung hat [16].⁴

4: Luhmann, H. J., Allgemeine Sinnesphysiologie, Thieme - via medici, <https://viamedici.thieme.de/lernmodul/543135/subject/physiologie/allgemeine+neurophysiologie/sensorische+systeme+und+prinzipien+der+signalverarbeitung/allgemeine+sinnesphysiologie>

Das visuelle Sehen



Abbildung 2.1: Anatomie des des Auges⁵

Das Auge nimmt die Umgebung über elektromagnetische Wellen (Licht) wahr. Trifft Licht durch die Linse des Auges auf die innere Netzhaut (Retina), registrieren 126 Millionen Sehzellen Informationen. Lichtempfindlichen Stäbchen geben Helligkeitsinformationen und Zapfen rote, grüne und blaue Farbinformationen in Form von Impulsen weiter. Die Foveola centralis (Ort des schärfstens Sehens) ist auf der Netzhaut lokalisiert und verfügt mit der höchsten Dichte an Sehzellen über die größte Abbildungsschärfe. Damit das Licht optimal auf die Foveola centralis auftrifft, stellen Muskeln die Linse des Auges in Abhängigkeit der Entfernung zum betrachteten Punkt ein (Akkommodation). Die Bildinformationen werden bereits in der Netzhaut analysiert (Helligkeit, Farbe, Kontrast und Bewegung) und über den Sehnerv an den visuellen Cortex weitergeleitet. Dort erfolgt die Weiterverarbeitung durch den Abgleich mit gespeicherten Erfahrungen [16].⁶

Okulomotorik

Das Auge führt mit der Fixation, dem Driften, Verfolgen, Zittern, Rotieren, Blinzeln, Konvergenz und Sakkaden unterschiedliche Bewegungsabläufe (Okulomotorik) durch. Durch die Veränderung der Iris wird beim Fokussieren die in das Auge einfallende Lichtmenge reguliert, sichtbar wird dies am Durchmesser der Pupille. Die Augenmuskeln setzen an der Lederhaut an und rotieren das Auge in der Augenhöhle. Beim Blinzeln werden die Augen im

5: Alila Medical Media, <https://www.shutterstock.com/de/g/alila>

6: Luhmann, H. J., Allgemeine Sinnesphysiologie, Thieme - via medici, <https://viamedici.thieme.de/lernmodul/543135/subject/physiologie/allgemeine+neurophysiologie/sensorische+systeme+und+prinzipien+der+signalverarbeitung/allgemeine+sinnesphysiologie>

Wachzustand semiautomatisch von den Augenlidern verdeckt (100-400ms). Zur Fixation eines Betrachtungspunktes in geringer Entfernung rotieren die Augäpfel gleichzeitig nach Innen (Konvergenz), hingegen erfolgt bei größerer Distanz eine gegensinnige Rotation nach Außen (Divergenz). Sakkaden sind kurze, sprungartige Bewegungen (20-40ms) zwischen Fixationen [14, 16].

2.1.2 Schlaganfall

Bei einem Schlaganfall sterben durch die Blutung oder in Folge der Sauerstoff- und Nährstoffunterversorgung Gehirnzellen ab. Die Hirnläsion kann sich nach Ausmaß in vielseitigen motorischen oder kognitiven Einschränkungen äußern. Typische Symptomaten sind Aufmerksamkeitsdefizite, Orientierungsschwierigkeiten, eine erhöhte Ermüdbarkeit sowie eine z. T. auftretende kognitive Verlangsamung. Um gute Resultate zu erzielen, erfolgt die Rehabilitation möglichst früh und intensiv [10].⁷

2.1.3 Visueller Neglect

Der visuelle Neglect (USN, *unilateral spatial neglect*) äußert sich in einer Störung des kontraläsionalen räumlichen Wahrnehmungsfeldes und tritt bei 25–30% aller Schlaganfallpatienten auf. Der Neglect tritt typischerweise nach der Schädigung der rechten Hemisphäre (Gehirnhälfte) auf und betrifft die linke Seite des Gesichtsfeldes. Eine rechtsseitige Läsion (linksseitiger Neglect) tritt bei etwa 90% aller USN-Patienten auf [11]. Das taktile und visuelle Erkunden durch Augen- und Kopfbewegungen fokussiert sich auf die rechte Seite (Ipsiläsional) und beginnt fast ausschließlich auf dieser (Abb. 2.2). Reize (visuell, auditiv, taktil, olfaktorisch) auf der ipsiläsionalen Seite werden üblicherweise besonders stark und lange wahrgenommen, während sie auf der kontraläsionalen Seite kaum Beachtung (Aufmerksamkeit) bekommen [10, 17].

7: National Institute of Neurological Disorders and Stroke (NINDS), National Institutes of Health (NIH), <https://www.ninds.nih.gov/health-information/disorders/stroke?search-term=stroke>

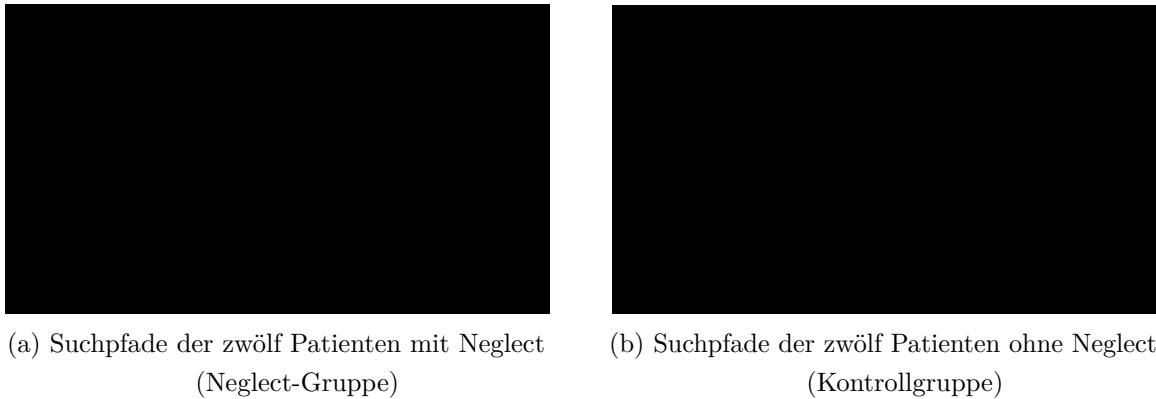


Abbildung 2.2: Das Explorationstraining von Fruhmann-Berger et al. illustriert das asymmetrische Suchverhalten des USN zur ipsiläsionalen Seite (rechts). Die Suchlinien zeigen als Kombination von Augen- und Kopforientierung das aktive Suchverhalten (schwarz) und in Ruhe ("tue nichts", grau). Die Achsenbeschriftung stellt den Sichtbereich von $240^\circ \times 80^\circ$ dar. [18, 19]

Der Patient ist sich des asymmetrischen Suchverhaltens nicht bewusst (*Unawareness*). Je nach Schweregrad variiert die Störung der Aufmerksamkeit. Während bei einer leichten Ausprägung vereinzelte Gegenstände der kontraläsionalen Seite unbeachtet bleiben („Hemi-Neglect“), ist bei einer starken Ausprägung das Suchverhalten auf die ipsiläsionale Seite beschränkt („Halbseiten-Neglect“) [17].

Diagnose

Die Bewertung eines USN erfolgt üblicherweise mithilfe von konventionellen *Paper-and-Pencil Tests*. Hierzu gehören der *Cancellation Test* zum Durchstreichen von z. B. Sternen, der *Line bisection Test* mit dem Markieren des Mittelpunktes einer Linie sowie Zeichen- und Kopieraufgaben. Während die Tests zu Beginn (Akutphase) ausreichende Ergebnisse liefern, nimmt die Sensitivität zu einem späteren Zeitpunkt (chronische Phase) durch erlernte Kompensationstechniken ab, sodass gewisse USN-Symptome nicht mehr erkannt werden. Das VR-gestützte Bewertungstools *iVRoad - immersive Virtual Road* bietet die Möglichkeit, den USN in einem realitätsnahen Kontext zu diagnostizieren. Wagner et al. identifizierten in einer Studie geeignete Parameter, um gesunde Teilnehmer von USN-Patienten unterscheiden zu können. Indem der Nutzer in VR eine befahrene virtuelle Straße überquert, identifiziert das System entscheidende Verhaltensparameter, die für die chronische Phase valide Ergebnisse liefern [20, 21].

Klassifikation

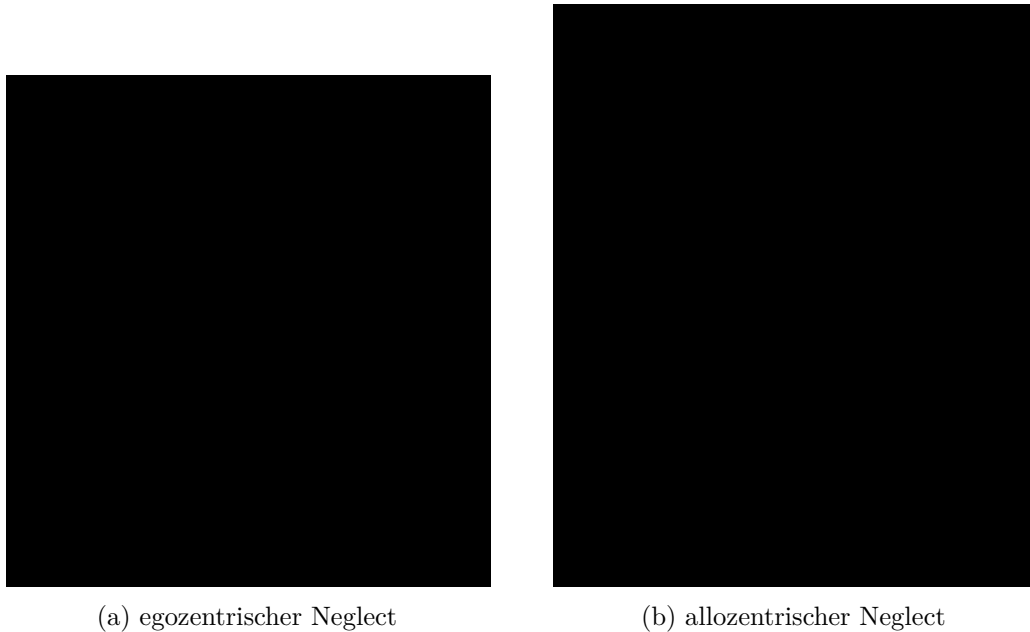


Abbildung 2.3: Die Kopieraufgabe von Korte et al. illustriert den Unterschied des egozentrischen und allozentrischen Neglects (Aus: [22])

Der visuelle Neglect (USN) wird in Relation zur Betrachterposition oder anhand des körperbezogenen Raumbereiches in Subtypen klassifiziert. In seiner klinischen Terminologie bezieht er sich jedoch vorrangig auf den egozentrischen Neglect [23].

- Bei dem egozentrischen (*egocentric*) Neglect, wird ein Stimulus auf der kontralateralen Seite in Abhängigkeit der Betrachterposition (Sagittalebene des Kopfes) vernachlässigt.
- Bei dem allozentrischen (*allocentric*) Neglect, wird eine Seite des Stimulus (z.B. ein Objekt) unabhängig von der Betrachterposition vernachlässigt.

Gemäß seiner Manifestierung wird der USN nach körperbezogenen Raumbereichen deklariert.

- Der persönliche Raum ist durch den eigenen Körper definiert. Durch den Neglect wird z. B. die linke Körperhälfte nicht wahrgenommen.
- Der peripersonale Raum ist durch die umgebende Armreichweite definiert. Als typisches Beispiel wird das Essen der linken Tellerhälfte vernachlässigt.
- Der extrapersonale Raum bezeichnet die Umgebung über die Armreichweite hinaus. Patienten registrieren Personen oder Objekten auf ihrer linken Seite nicht, wodurch es häufig zur Kollision kommt [23].

Behandlungsansätze

Die Behandlungsmethoden teilen sich in Top-down und Bottom-up Ansätze ein und erfolgen optimalerweise kombiniert. Erstere fokussieren sich auf das aktive Erlernen systematischer Suchstrategien. Ansätze stellen das klassische visuelle Explorationstraining (Suchtraining, *Visual scanning therapy*) dar, hierzu zählen die Aufmerksamkeitsausrichtung und kognitives Training (mit dem Ansprechen der betroffenen Seite). Letztere erfordern kein aktives Bemühen und versuchen als physiologische Ansätze durch eine sensorische Stimulation die Aufmerksamkeit auf die vernachlässigte Seite zu lenken [10, 24]. Zugehörige Therapieverfahren sind unter anderem die Prismenadaptation, Augenklappen, Nackenmuskelvibration und die optokinetische Stimulation (OKS), welche das Ziel haben, eine Verbesserung der räumlichen Orientierung hervorzurufen. Bei der OKS werden sich zur kontraläsionalen Seite bewegende Punkte oder Muster beobachtet (*horizontal scanning*). Die visuelle Stimulation löst den optokinetischen Nystagmus Reflex aus, wodurch die Augen sich mit der Bewegungsrichtung des Objektes bewegen und rasch zurückstellen (Rückstellsakkaden), sodass das Objekt optimal auf die Fovea centralis (Retina) abgebildet wird (*Bottom-up*) [10, 24, 25]. Das Suchtraining zielt auf eine schnellere und vollständige Suche aller Regionen ab (*Top-Down*). Um die Beachtung der kontraläsionalen Seite zu erreichen, wird die Intervention beim Training mit „Hinweisen“ durch Reize (visuell, auditiv oder taktil) auf der vernachlässigten Seite ergänzt [11, 23].

Neben den klassischen Behandlungsmethoden wird Virtual Reality (VR) als ein fortschrittlicher und vielversprechender Behandlungsansatz betrachtet, welcher in Bezug auf die Forschung noch am Anfang steht [1, 11].

2.2 Technischer Hintergrund

2.2.1 Immersion, Interaktion und Imagination

Die virtuelle Realität (VR) zeichnet sich durch ein Zusammenspiel der drei Begriffe aus: der Immersion, der Interaktion und der Imagination. Nach Dörner et al. erstellt ein VR-System durch den Einsatz von Hardware und Software eine virtuelle Realität dar. Der computergenerierte Inhalt wird als virtuelle Welt bezeichnet und erscheint für den Nutzer als virtuelle Umgebung (VU) [16].

- Die Immersion versucht den Nutzer in die virtuelle Umgebung eintauchen zu lassen. Für ein starkes Präsenzgefühl werden mit Hilfe von computergenerierten Inhalten die menschlichen Sinne möglichst allumfassend angesprochen.

- Bei der Interaktion tritt der Nutzer über unterschiedliche Interaktionsarten (Abs. 2.2.3) mit der virtuellen Umgebung in Wechselwirkung.
- Die Imagination bezeichnet die Fähigkeit des Nutzers sich in die virtuelle Umgebung hineinzuversetzen [16, 26].

2.2.2 Aufbau eines VR-Systems

Ein VR-System stellt eine Schnittstelle zwischen Mensch und Computer dar, die sich aus Ein- und Ausgabegeräten sowie der computergestützten Weiterverarbeitung (VR-Teilsysteme) zusammensetzt. Ausgabegeräte ermöglichen die Wahrnehmung und Eingabegeräte die Interaktion mit der virtuellen Umgebung. Eingabegeräte verwenden Tracking, um mittels Sensoren und Algorithmen die 3D-Position in Form von Position- und Orientierungsdaten zu ermitteln. Die Ortsbestimmung findet in Abhängigkeit der Trackingperformance und auftretender Einflussgrößen (Verdeckungen, Lichtverhältnisse) in Echtzeit statt. Mit der Kombination von Sensoren (Sensorfusion) wird versucht, etwaige Vor- und Nachteile der verwendeten Trackingsysteme auszugleichen, um möglichst präzise Daten zu erhalten. Der Einsatz von Ausgabegeräten hat das Ziel, einen hohen Immersionsgrad und ein realitätsnahes Verhalten hervorzurufen. Neben technischen Merkmalen wie einem großen Sichtfeld, hoher Bildschirmauflösung und -frequenz ist eine hohe Bewegungsfreiheit⁸, multimodale Stimulation und die Abschirmung von äußeren Reizeinflüssen entscheidend [16, 27].

⁸: Kabelgebundene Geräte können die Bewegungsfreiheit limitieren, indem die reale Interaktionsfläche verkleinert wird oder der Nutzer sich in Kabeln verfängt.

HTC Vive Pro Eye

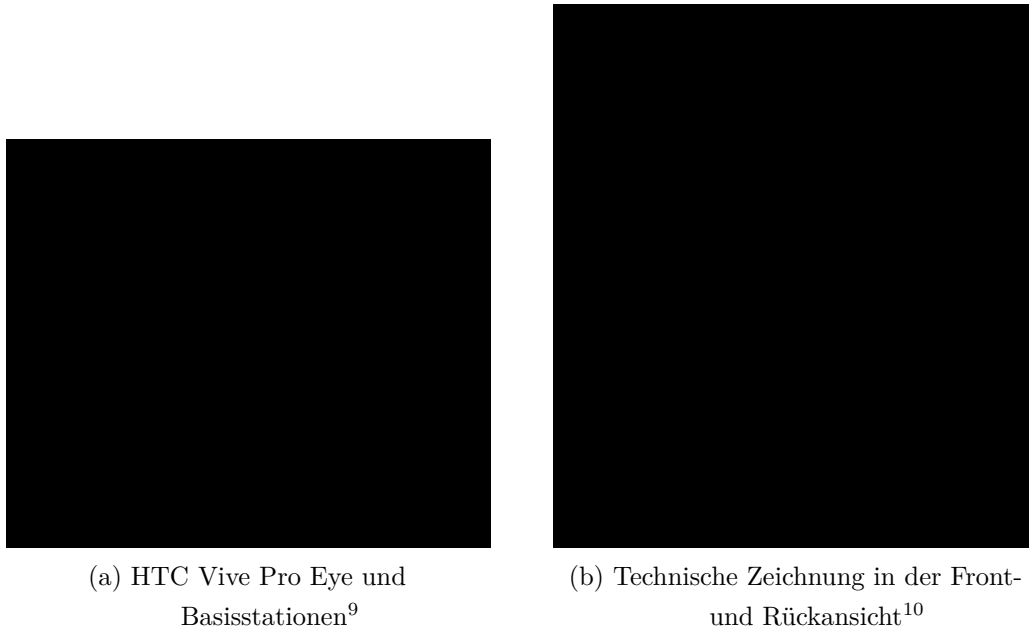


Abbildung 2.4: HTC Vive Pro Eye

Die HTC Vive Pro Eye erfasst die 3D-Kopfposition des Nutzers (Eingabegerät) und ermöglicht es ihm in die virtuelle Welt einzutauchen (Ausgabegerät). Die VR-Brille (HMD, *Head-Mounted Display*) verspricht eine Trackinggenauigkeit im Submillimeterbereich, eine Auflösung von 1440 x 1600 Pixel pro Auge (2880 x 1600), eine Bildfrequenz bis zu 90 Hz, ein horizontales Sichtfeld von 110° und verfügt über integrierte Eyetracker mit einer Frequenz von bis zu 120 Hz (Abb. 2.4).⁷ Der Augenabstand (IPD, *Interpupillary distance*) ist der Abstand zwischen dem Mittelpunkt beider Augen. Bei der Kalibrierung (Abs. 2.2.5) stellt der Nutzer den passenden Linsenabstand mittels Drehschalter am HMD ein. Anschließend fokussiert er auf dem binokularen Display fünf Punkte an unterschiedlichen Positionen, sodass entsprechende Messwerte ermittelt werden. Zum Tracking eines HMD wird zwischen zwei Verfahren unterschieden. Während bei Outside-In Trackingverfahren Kamerasysteme die Szene von Außen aufnehmen, wird beim Inside-Out Tracking die Umgebung (Szene) durch in das HMD integrierte Systeme aufgenommen. Die HTC Vive Pro Eye basiert auf dem Inside-Out Trackingverfahren und nutzt das von Valve entwickelte SteamVR-Tracking. Die Basisstationen (Version 2.0) emittieren als 150° Laserquelle kontinuierlich Infrarotstrahlung, die dem HMD als Referenzpunkt dient (Abb. A.2). Die Sensoren der Vive Pro Eye registrieren das Licht, sodass die 3D-Position als Referenz des Kopfes im Raum bestimmt werden kann [16].^{10, 11, 12}

9: <https://www.vive.com/us/product/vive-pro-eye/overview/>

10: <https://www.vive.com/us/product/vive-pro-eye/specs/>

11: <https://partner.steamgames.com/vrlicensing#HowItWorks/>

12: https://developer.vive.com/documents/718/VIVE_Pro_Eye_user_guide.pdf

2.2.3 Interaktionsarten

Die Kommunikation von Mensch und Maschine erfolgt über eine Benutzerschnittstelle durch die Verwendung unterschiedlicher Interaktionsarten. Die grundlegenden Interaktionsarten sind die Selektion, Manipulation, Navigation und Systemsteuerung [16].

Basierend auf Dörner et al. definieren wir im Folgenden die Begriffe Selektion und Navigation. Die Selektion bezeichnet die Auswahl eines Objektes in der VU repräsentiert als Punkt, Fläche oder Volumen. Bei der Manipulation werden spezifische Parameter eines virtuellen Objekts verändert. Hierzu zählen u. a. die Lage und Orientierung im Raum, die Farbgebung oder Textur. Die Navigation besteht aus der Fortbewegungstechnik & Wegfindung und bezeichnet die 3D-Interaktion, um z.B. Gebäude oder Städtemodelle zu erkunden. Bei der Fortbewegungstechnik wird durch Bewegung die Kameraposition und -orientierung in der VU angepasst. Bei der Wegfindung erstellt der Nutzer meist unterbewusst eine kognitive Karte der VU. Hierbei durchläuft er kognitiv die Prozesse der Analyse, Planung und Entscheidung. Bei der Systemsteuerung wird der Zustand des Systems oder der Interaktionsmodus durch den Nutzer angepasst. Z. B. kann über einen virtuellen, interaktiven Display-Slider die Lautstärke des Systems reguliert werden [16].

Die Interaktionstechnik *Ray-Casting* ermöglicht die Interaktion mit Objekten hinter der Armreichweite. Von einem Ursprungspunkt des Nutzers wird ein Strahl in die virtuelle Welt entsendet, sodass das erste entlang des Strahles getroffene Objekt selektiert oder manipuliert werden kann [16, 28].

Fortbewegungstechniken

Boletsis et al. teilen die Fortbewegungstechniken nach der Interaktionsart in die Kategorien Physisch und Künstlich ein. Eine fortführende Unterteilung erfolgt in ununterbrochene, kontinuierliche (continuous) oder augenblicklich, abrupte Bewegungsabläufe (non-continuous). Eine weitere Einteilung erfolgt danach, ob der reale Interaktionsraum größer (offen) oder kleiner (limitiert) als der virtuelle Interaktionsbereich ist (Abb. 2.5) [29].



Abbildung 2.5: Die systematische Übersichtsarbeit von Boletsis et al. basiert auf 42 wissenschaftlichen Publikationen und illustriert die Typologie der Fortbewegungstechniken in der VR (Aus: [29])

Bewegungsbasiert (motion-based):

- *Walking in Place*: Indem das Trackingsystem eine Laufbewegung auf der Stelle erkennt, bewegt sich der Nutzer in VR vorwärts.
- *Redirected Walking*: Die Technik ermöglicht es, trotz eines kleinen Trackingbereiches eine große virtuelle Umgebung zu begehen. Während der Nutzer in der Realität eine Kurve entlang läuft, wird das Gehen in der VR durch eine visuelle Richtungsanpassung kaum wahrnehmbar umgeleitet, sodass dem Nutzer das Laufen auf einer geraden Strecke suggeriert wird.

Raumgrößen-basiert:

- *Reales Gehen*: Durch physisches Gehen bewegt sich der Nutzer in der VU.

Controller-basiert:

- Joysticks werden als Steuerungselement verwendet.
- Stuhlbasiert: Indem der Nutzer einen interaktiven Stuhl dreht oder den Körperschwerpunkt gezielt verlagert, wird die Fortbewegung in VR gesteuert.

Teleportationsbasiert:

- Mit der Teleportation kann der Nutzer gezielt die Position wechseln. Durch die Fortbewegungstechnik kann eine große Strecke überbrückt werden. Bei der *Point & Teleportation* selektiert der Nutzer einen Punkt im Sichtbereich und teleportiert sich abrupt zur Zielposition [16, 29].

2.2.4 Cybersickness

Bei der Nutzung von VR-HMD kann Cybersickness in Form von Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel, Desorientierung und Koordinationsschwierigkeiten (Ataxie) auftreten. Das Phänomen lässt sich bisher auf keine evidenzbasierte Ursache zurückführen, sodass in der Forschung die Annahme vertreten wird, dass das Phänomen auf verschiedene Ursachen zurückzuführen ist (multifaktorielles Problem). Die Akkomodation-Konvergenz Diskrepanz bezeichnet die zu einer visuellen Stimulation fehlenden vestibulären Reize. Wird auf dem Display eine virtuelle Bewegung durchgeführt, fehlen die in der Realität dazugehörigen Wahrnehmungsreize. Bei dem Vergence-Fokus-Konflikt treten Inkonsistenzen innerhalb einer Wahrnehmungsart auf. Dies können fehlende¹³, falsche oder widersprüchliche¹⁴ Tiefenhinweise wie Schatten sein, die zu einer fehlerhaften Einschätzung und Wahrnehmung des Raumes führen [16, 30].

Als subjektive Messmethode wird Cybersickness mithilfe von Fragebögen erfasst. Für diesen Zweck wird üblicherweise der Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) verwendet, welcher ursprünglich für die Bewegungskrankheit (simulator sickness) entwickelt wurde. Der Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire (CSQ-VR) erfasst hingegen das Auftreten von Cybersickness speziell für VR-Anwendungen [30–32]. Für das Auftreten von Cybersickness gibt es begünstigende Faktoren. Dörner et al. ordnen diese der Person, dem VR-System und der Anwendung zu.

- Zu den personenbezogenen Faktoren gehören das Geschlecht, Alter, Vorerfahrungen mit VR sowie die generelle Anfälligkeit für die Bewegungskrankheit.
- Faktoren des VR-Systems sind die Bildfrequenz (fps, frames per second), die Größe des Sichtfeldes (FoV, *field of view*), Trackingfehler, Systemkalibrierungen und Latenzen¹⁵ für die es gilt, einen Wert von 20 ms anzustreben und eine Verzögerung größer 40 ms zu vermeiden.
- Anwendungsspezifische Faktoren beziehen sich auf die Gestaltung der VR aus der Sicht des Nutzers. Hierzu zählen die Positionierung (liegend, sitzend, stehend) des Nutzers, der Bewegungsfluss (linear, abrupt) und die Geschwindigkeit der Nutzerbewegung, eine häufige und starke Rotation des Nutzers und zu wenig räumliche Orientierungspunkte [16].

13: Gemeint ist z. B. die unzureichende Performanz des Systems zur Berechnung von Schatten in Echtzeit [16].

14: Bei der *Frame Cancellation* widersprechen sich Disparitäten und Verdeckung. Für ein virtuelles Objekt suggeriert die stereoskopische Darstellung die Position vor dem Display (negative Parallaxe), während eine Objektverdeckung durch den Displayrand auf eine Position hinter dem Display hindeutet [16].

15: Latenzen treten bei einem HMD als Eingabe- und Ausgabegerät auf. Wird der Kopf gedreht, tritt eine zeitliche Verzögerung bei der Registrierung der neuen 3D-Position (Tracking) und der angepassten Bilddarstellung in VR (HMD-Display) auf. [16].

Um das Auftreten von Cybersickness bei der Verwendung von VR-HMD zu verringern, gilt es die begünstigenden Faktoren zu minimieren. Neben einer hohen Rechenleistung und guten Trackingbedingungen gibt es geeignete VR-Implementierungen. Statt eine Strecke in VR zu gehen, kann sich der Nutzer teleportieren. Für eine Rotation kann künstliches *Blurring* (Verwischen) verwendet werden.

2.2.5 Eye-Tracking

Als Eyetracking (ET) bezeichnet man den Prozess, um die Blickrichtung der Augen zu verfolgen oder die Position der Augen relativ zum Kopf zu bestimmen. ET-Verfahren setzen unterschiedliche Technologien ein, um den Blickverlauf zu erfassen und eine Auswertung zu ermöglichen. Dörner et al. gruppieren die Verfahren in invasiv und nichtinvasiv [16, 33].

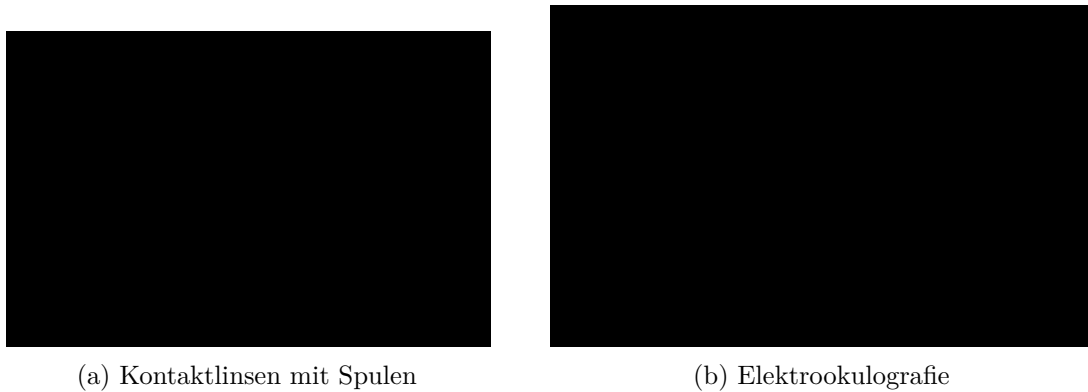


Abbildung 2.6: Invasive Eyetracking Verfahren (Aus: [33])

Die ersten ET-Verfahren waren invasive Verfahren, bei denen ein direkter Eingriff im Körper bzw. Auge stattfindet. Hierzu zählen die Elektrookulografie und die Kontaktlinsenmethodik. Bei der Elektrookulografie (*Electro-OculoGraphy*, EOG) werden durch Oberflächen Elektroden die elektrischen Potenziale des Auges über die angrenzende Haut des Auges gemessen (Abb. 2.6). Kontaktlinsen mit Spulen messen die Änderung eines magnetischen Feldes. Beide Methoden ermitteln die Position der Augen relativ zum Kopf. Bei Kontaktlinsen mit Reflektoren kann hingegen durch das reflektierte Licht auf die Blickrichtung geschlossen werden [16, 33].

Nichtinvasive Verfahren ermitteln mithilfe von Kameras die Blickrichtung der Augen berührungslos. Videobasiertes ET gilt als etabliertes und kostengünstiges Verfahren. Um den Blickpunkt (POR, *Point Of Regard*) in Echtzeit zu bestimmen, werden die Augen durch Umgebungslicht (passiv) oder Infrarotlicht (aktiv) bestrahlt und die Reflexion durch Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen. Abb. 2.7 stellt die präzisere Merkmalsidentifikation der aktiven Bestrahlung dar. Unabhängig von der Art der Bestrahlung wird

die Blickrichtung durch merkmalsbasierte und/oder modellbasierte Verfahren ermittelt. Merkmalsbasierte Verfahren detektieren über die erfassten Bilddaten anatomische Konturen. Hierbei wird mittels Bildverarbeitungsalgorithmen der Mittelpunkt der Pupille in Relation zur Hornhautreflexion (1. Punkinje Bild, korneale Reflexion) bestimmt. Die Infrarotlichtquellen befinden sich relativ zum Auge in einer festen Position, sodass die Hornhautreflexion bei einer Augenbewegung weitestgehend stabil bleibt. Wird der Augapfel rotiert, verändert sich der Abstand zwischen den beiden Referenzpunkten. Modellbasierte Verfahren passen ein definiertes Modell des Auges durch gesammelte Bildinformationen iterativ an. Entspricht der Unterschied einer gewissen Fehlertoleranz, lassen sich die relativen Blickkoordinaten ermitteln [14, 16, 33].

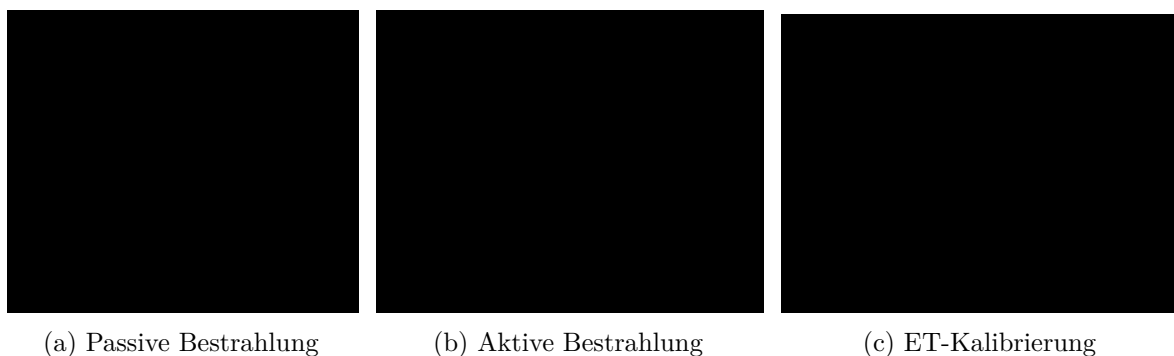


Abbildung 2.7: Zeigt das bessere Kontrastverhältnis der aktiven Infrarotlicht-Bestrahlung (b) im Vergleich zur passiven Bestrahlung (a) durch Umgebungslicht (Aus: [16]). Weiterhin wird die relative Position der Pupille (schwarz) und das erste Punkinje Bild (weiß) bei einer ET-Kalibrierung mit neun-Punkten visualisiert (Aus: [33]).

Bei einer ET-Kalibrierung fixiert (Fixation) der Nutzer korrespondierende Punkte auf dem Monitor, wodurch der Zusammenhang zwischen dem Koordinatensystem der Kamera und des virtuellen Bildes ermittelt werden kann. Nach erfolgreicher Kalibrierung kann der Zusammenhang zwischen der Blickrichtung und der betrachteten Region (Blickpunkt) in einem virtuellen Bild bestimmt werden (Abb. 2.7) [16, 33]. HMD mit integrierten ET verwenden fast ausschließlich das nichtintensive videobasierte Verfahren. Für das Tracking sind in der HTC Vive Pro Eye je Auge eine Infrarotkamera und 9 Nah-Infrarot LEDs ringförmig um die Optik integriert (Abb. 2.4) [34].

Zusammenfassung

In dem zweiten Kapitel wurden dem Leser die wichtigsten theoretischen Grundlagen zum Verständnis der Arbeit erläutert. Neben der Sinneswahrnehmung wurden für den visuellen Neglect die Manifestierung, die typische Symptomatik und therapeutische Verfahren wiedergegeben. Für den technischen Teil wurde mit dem Aufbau eines VR-Systems,

den Funktionalitäten der HTC-Vive Pro, ET-Verfahren und den Interaktionsarten ein Verständnis geschaffen, wie der Nutzer mit einer VU in Interaktion treten kann.

3 Verwandte Arbeiten zur VR-gestützten Rehabilitation

Dieses Kapitel gibt einen Überblick für die computergestützte Rehabilitation des visuellen Neglects mit VR. Die Recherche zur Selektion der wissenschaftlichen Studien wurde mit den digitalen Bibliotheken *Google Scholar*, *Researchgate* und dem *Institute of Electrical and Electronics Engineers* durchgeführt. Hierbei wurden die entsprechenden Veröffentlichungen durch die Verwendung der thematischen Schlüsselwörter *unilateral spatial neglect*, *rehabilitation*, *virtual reality* und *eye tracking* gefunden. Weiterhin bot das *Neuropsychiatric Disease and Treatment Journal* [11] eine thematische Übersicht über relevanter Studien im Bereich der USN-Rehabilitation mit VR. Für die Studien wird aufgezeigt, wie die therapeutischen Verfahren als Training in die VR implementiert wurden. Des Weiteren werden der Studienaufbau und etwaige kognitive Verbesserungen der Patienten erläutert. Mit dem Zusammenfassen wissenschaftlicher Ergebnisse werden das Potential des Forschungsbereiches und sinnvolle Gestaltungsmöglichkeiten für die Implementierung therapeutischer Verfahren in VR aufgezeigt. In der Arbeit von Kim et al. [35], Fordell et al. [36] und Yasuda et al. [37] wird das Explorationstraining in VR-Umgebungen dargestellt. Wie eine geeignete auditive Hilfestellung aussehen kann, zeigt die Veröffentlichung von Cogne et al. [38], während Chatterjee et al. [39] das Training alltäglicher Aktivitäten in VR schildern.

3.1 Visuelles Suchtraining

Kim et al. [35] verglichen in einer Studie mit 15 Trainingseinheiten (TE) verteilt über drei Wochen das Explorationstraining (Suchtraining) als konventionelle Therapie mit einer VR-Anwendung (IREX system) mit drei praktischen Aufgaben: 1. Das Berühren fliegender Vögel mit der Hand zur Umwandlung in Bälle, 2. Das Auffangen herunterfallender Kokosnüsse und 3. das Bewegen eines Containers von der einen zur anderen Seite. Für die Anwendung wurde ein Monitor und eine Videokamera in Verbindung mit registrierbaren Handschuhen verwendet. Im nachfolgenden Test (Star cancellation und Catherine Bergego Scale) erzielte die VR-Gruppe signifikant höhere Ergebnisse als die Kontrollgruppe [35].

Mit der VR-Anwendung RehAtt von Fordell et al. [36] absolvierten 15 Schlaganfallpatienten (rechtsseitiger ischämischer Hirninfarkt) ein Explorationstraining in Verbindung mit taktiler Stimulation und einem visumotorischem Training. Mit Hilfe von vier VR-Subtests wurde der

Neglect diagnostiziert, indem mindestens ein Testergebnis unterhalb des Schwellenwertes lag. Außerdem mussten Beeinträchtigungen bei alltäglichen Aktivitäten bestehen. Die Studie umfasste 15 TE (Dauer a: $3 \times 1h$) über einen Zeitraum von fünf Wochen. Zur Bedienung wurde ein „Roboter-Stift“ (PHANTOM OMNI System) mit haptischem Feedback sowie ein Bildschirm in Verbindung mit einer stereoskopischen Brille (Nvidia 3D Vision) verwendet. Das VR-Training umfasste drei Interaktionsaufgaben. 1. Die Bewegung (von links nach rechts) und das korrekte Platzieren einer 3D-Figur. 2. Das Aufnehmen (rechte Seite) und Platzieren von 3D-Würfeln in einer geraden 3D-Linie. 3. Ein 3D-Puzzle mit der korrekten Positionierung von sich in das Sichtfeld bewegend Geometrien (von oben oder links). Der Post-Test¹⁶ ergab eine Verbesserung der visuospatialen Fähigkeiten und unmittelbar nach dem Training durchgeführter alltäglicher Aktivitäten [36].

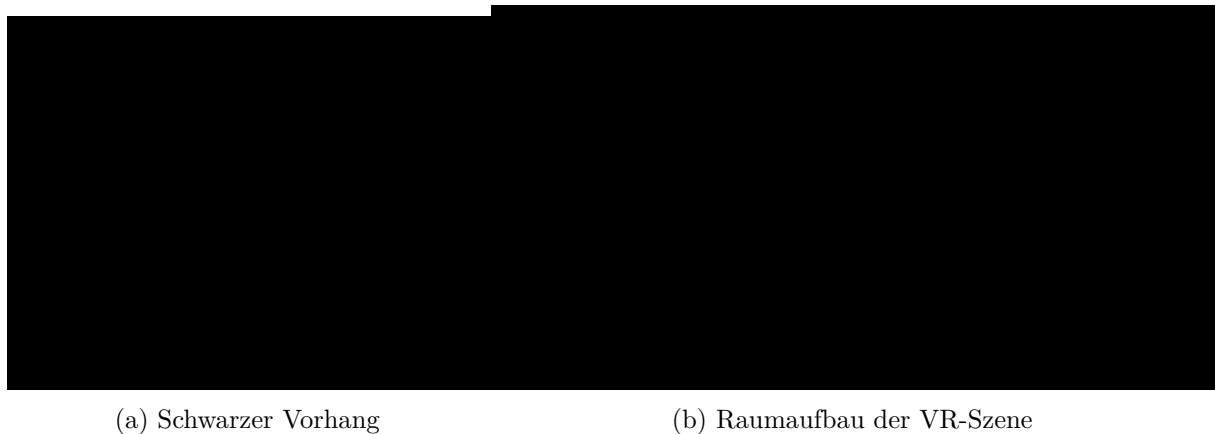


Abbildung 3.1: Stellt das VR-System zum Training im peripersonalen (Objekte greifen) und extrapersonalen (visuell blinkende Objekte benennen) Raumbereich dar. Gezeigt wird der Aufbau des VR-Raumes (b) und ein schwarzer Vorhang um die Aufmerksamkeit nach links zu lenken (Aus: [37]).

Yasuda et al. [37] entwickelten ein VR-Trainingssystem für Neglect-Patienten zum Training im Nah- und Fernbereich. Die Aufgabe war es, im peripersonalen Raumbereich (Armreichweite) Objekte durch die Verwendung des Leap Motion Controllers zu greifen und im extrapersonalen Raumbereich (15 m) visuell blinkende Objekte von rechts nach links zu benennen. Um die Aufmerksamkeit nach links zu lenken, wurde ein sich bewegend Vorhang verwendet. Mit der Bewegung nach rechts (Verdeckung der linken Seite) und der anschließenden Bewegung zurück nach links, wanderte ein sichtbarer Bereich von rechts nach links. Mit zehn Probanden wurde in einer Pilotstudie die Leistung vor und nach dem VR-Training durch konventionelle Tests evaluiert. Während die Ergebnisse für den Fernbereich eine Verbesserung zeigten, wurde für den Nahbereich kein signifikanter Unterschied erzielt.

16: Star cancellation test, Baking tray task, Extinction test, Line bisection [36].

3.2 Hilfestellungen und alltägliche Aktivitäten



Abbildung 3.2: Stellt die Reproduktion eines Weges durch eine nordamerikanische Stadt (a) zum Training des räumlichen Gedächtnisses dar (Aus: [38]). Die VR-Anwendung VIRTUE ermöglicht das Training von Alltagstätigkeiten (b, c) in patientengerechten VR-Umgebungen (Aus: [39]).

Die Studie von Cogne et al. [38] untersuchte die Auswirkung von auditiven Hinweisen („lateralisiertes Cueing“) vor und nach der Prismenadaptation (PA) auf die virtuelle räumliche Navigation. Durch die Verwendung von Eye-Tracking (Tobii Pro TX300) wurde geprüft, ob die auditiven Hinweise zu einer Verbesserung des räumlichen Gedächtnisses führen. Hierfür wurden die Sakkaden und die Fixationsdauer erfasst. Die Anwendung beinhaltete eine virtuelle 3D-Umgebung einer nordamerikanischen Stadt (Abb. 3.2). Für die Bedienung wurde ein Laptop in Verbindung mit einem Joystick verwendet. Die Aufgabe bestand darin, einen zuvor passiv gezeigten Weg m. H. des Joysticks zu reproduzieren. Hierbei wurde zwischen der Navigation ohne Hinweisen, mit Hinweisen (vor der PA) und mit Hinweisen nach der PA unterschieden. Die auditive Hilfestellung bestand darin, durch ein Piepen die Zielrichtung zu signalisieren (links, rechts, geradeaus).

Die Teilnehmer setzten sich aus 22 Patienten mit unilateralen visuellen und auditiven Neglect (rechtshemisphärischer Schlaganfall), 14 Patienten ohne visuellen und auditiven Neglect (rechtshemisphärischer Schlaganfall) und zwölf gesunden Probanden (Kontrollgruppe) zusammen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Teilnehmer mit Neglect sich durch die akustischen Hinweise signifikant besser navigieren konnten als ohne Hinweise. Nach der PA war dies besonders bemerkbar. Wiederum waren die Ergebnisse der Neglect-Gruppe für das räumliche Gedächtnis mit Hinweisen niedriger. Die Eye-Tracking Analyse zeigte, dass die Patienten ohne Hinweistöne mehr Sakkaden durchführten und eine höhere Fixationszeit zur rechten Seite aufwiesen. Die Teilnehmer ohne Neglect erreichten mit den auditiven Hinweisen die gleichen Ergebnisse für die Navigation wie die Kontrollgruppe. Die Studie hebt die Bedeutung der auditiven Hinweise für eine verbesserte virtuell räumliche Navigation und das Potenzial der Hinweise nach der PA für Neglect-Patienten hervor [38].

Mit der Anwendung VIRTUE von Chatterjee et al. [39] trainieren Schlaganfallpatienten alltägliche Aktivitäten und Tätigkeiten. Im Folgenden werden zum besseren Verständnis die im Entwicklungsprozess beteiligten Parteien und die verwendete Software und Hardware wiedergegeben. Die Entwicklung der Software erfolgte in Kooperation mit einem Unternehmen für medizinische Geräte, einer Universitätsforschungsgruppe und der Stroke Unit eines Krankenhauses als iterativer Entwicklungsprozess. Für die Entwicklung wurde Unity 3D mit dem Virtual Reality Toolkit verwendet. Die Bedienung erfolgte im Sitzen mit der Oculus Rift S und einem Touch Controller. Die Aufgaben teilen, sich auf die Szenen Schlafzimmer (Bett machen und Kleidung auswählen), Badezimmer (Wasser einlassen und Zähne putzen), Küche (Toast, Tee, Kaffee und Essen zubereiten), Garten (Pflanzen gießen), Café und Restaurant (Essen bestellen und bezahlen) auf (Abb. 3.2). Für Patienten mit visuellem Neglect wurde die Aufgabe angepasst, sodass auszuwählende Objekte auf der vernachlässigten Seite gesucht werden mussten. Die Bewertung wurde daran gemessen, ob der Patient es schafft die Aufgaben in der richtigen Reihenfolge zu erledigen. In einer doppelblinden Studie mit 40 Schlaganfallpatienten wurde die Anwendung hinsichtlich der Machbarkeit, Sicherheit und Akzeptanz sowie der kognitiven Verbesserung untersucht. Die Patienten wurden in die VR-basierte kognitive Behandlungsgruppe *VRT* oder die VR-Scheingruppe *Schein-VR* (Kontrollgruppe) für eine übliche Behandlung eingeteilt. Das Training fand fünf-mal die Woche für zwei Wochen statt.

Die VRT-Gruppe wurde für die Bewertung anhand des *Montreal Cognitive Assessment* (MoCa) Wert in zwei Gruppen unterteilt. Bei einem Patienten je Gruppe traten vorübergehender Schwindel und Müdigkeit auf. Die Akzeptanz wurde mithilfe eines Fragebogens bestimmt und war bei der VRT-Gruppe signifikant höher als bei der Schein-VR Gruppe. Letzterer wurden die VR-Szenen lediglich gezeigt, sie durfte diese jedoch nicht zum Training verwenden, was in einer 50% Akzeptanzquote resultierte. In beiden Gruppen wurde VIRTUE von Patienten mit leichter bis mäßiger Beeinträchtigung am besten bewertet. Bzgl. der Wirksamkeit konnten nach drei Monaten in den primären Messdaten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, wobei sich der MoCa-Wert aller Gruppen verbesserte. Die Zeitdauer des Krankenhausaufenthalts und die Zeit für die stationäre Physio- und Ergotherapie (VR) waren für die VRT-Gruppen signifikant kürzer [39].

Der gegenwärtige Forschungsstand verdeutlicht das Potenzial der VR in der Rehabilitation und zeigt, dass ein Bedarf an weiterer Forschung und der Entwicklung von effektiven VR-Trainingswendungen besteht. Neben den Studien von Kim et al., Chatterjee et al. und Cogne et al. zeigt sich Bedarf an weiteren randomisierten Kontrollstudien (randomised controlled trial, RCT). Dies deckt sich mit der Recherche anderer Wissenschaftler. In ihrer Recherche zur USN-Rehabilitation fanden Gammeri et al. [11] et al. lediglich eine Cavedoni et al. und [40] zwei RCT-Studien. Letztere hoben zudem hervor, dass von den 13 nach Kriterien ausgewählten VR-basierten Studien lediglich 6 eine Kontrollgruppe besaßen.

Während es in den letzten Jahren Studien mit realistischerer Gestaltung und ökologischeren Aktivitäten erschienen sind, besteht weiterhin Bedarf an ökologischer Validität (*ecological validity*). Hierfür benötigt es immersive und realitätsnahe VU die ein Wiedererlernen alltäglicher Aktivitäten zum Ziel einer optimalen Teilhabe ermöglichen. Weiterhin wäre für die Gestaltung einer VR-Intervention eine Richtlinie zur Auswahl einer verträglichen Zeitdauer für USN-Patienten von Vorteil [40]. Weil das Aufmerksamkeitsdefizit in den meisten Fällen auch nach der Rehabilitation bestehen bleibt und ein Training i.d.R. Zeit und Motivation benötigt, wird Bedarf für die Entwicklung umfangreicher VR-Trainingssysteme für das eigenständige Hometraining gesehen [10].

4 Konzept

In diesem Kapitel werden die im Entwicklungsprozess definierten Anforderungen an die VR-Trainingsanwendung erläutert. Die Einteilung der Anforderungen erfolgt in die Bereiche Interaktion, Trainingssystem, VR-Umgebungen, Hilfstools, Therapeutenoberfläche und Datenerfassung. Alle Bereiche hatten das Ziel, einen hohen Immersionsgrad bereitzustellen und eine Vergleichbarkeit zwischen den Patienten zu gewährleisten. Für ein verträgliches Training sollten zudem Cybersickness-Faktoren minimiert werden.

Die Entwicklung der Trainingssoftware erfolgte in einer engen Kooperation mit psychotherapeutischen Experten des Universitätsklinikums Leipzig (UKL). Durch die Teilhabe klinischer Expertise bestand das Ziel, eine möglichst patientengerechte und wirksame VR-Trainingsanwendung zur Rehabilitation zu entwickeln. Die Zielgruppe der Rehabilitation sollten Patienten mit linksseitigem Neglect (rechtshemisphärischem Schlaganfall) sein. Eine nachfolgende Studie verfolgte das Ziel, an Patienten ($N = 10$) eine kognitive Verbesserung zu untersuchen. Das Studiendesign sollte 10 Trainingseinheiten (TE) mit der VR-Trainingsanwendung sowie eine vorangehende und abschließende Testung mit dem Bewertungstool iVRoad umfassen. Eine Trainingseinheit entsprach einer therapeutischen Sitzung im UKL. Im Folgenden werden für jeden Bereich gesammelte Ideen wiedergegeben. Entwicklungsansätze und erste im iterativen Entwicklungsprozess getroffene Entscheidungen werden begründet. Hierbei wird durch den Bezug auf klinische Aussagen der Ursprung und die Notwendigkeit zur Umsetzung der Anforderungen aufgezeigt. In späteren Iterationen entstandene Anforderungen werden im Implementierungskapitel der Arbeit behandelt.

Im folgenden werden die im Entwicklungsprozess geäußerten Aussagen des klinischen Partners in eigenen Worten wiedergegeben.

- **1. Aussage:** Patienten neigen dazu, die erforderliche Augenbewegung zur vernachlässigten Seite durch eine Kopffrotation auszugleichen, sodass sich die Augen weiterhin auf das rechte Gesichtsfeld beschränken.
- **2. Aussage:** Die Einweisung und Durchführung eines Rehabilitationstrainings erfordern eine intensive Betreuung und ständige Anwesenheit eines Therapeuten.

- **3. Aussage:** Patienten denken häufig die VU ist die Realität, sodass fehlende Ausgänge, nicht einladende Umgebungen und das Verdecken von Orientierungspunkten Angst auslösen können.
- **4. Aussage:** Je nach Ausprägungsgrad sind Patienten durch die Rehabilitation schnell erschöpft, sodass sie die Augen schließen oder z. T. einschlafen.

4.1 Interaktion

Die Interaktion sollte simpel, realitätsnah und reproduzierbar sein und nicht dazu führen, dass Patienten zu schnell überfordert sind. Zum Abbilden kognitiver und neuronaler Vorgänge wurde im Vorfeld die HTC Vive Pro Eye mit integriertem Eyetracking und Headset ausgewählt. Um die Anforderungen zu erfüllen und einen identischen Blickpunkt für jeden Nutzer zu gewährleisten wurde sich für eine Bedienung im Sitzen ohne HMD-Positionstracking entschieden. Die Beschränkung auf definierte Nutzerpositionen im Raum hatte das Ziel, eine simple Interaktion ohne Physische Fortbewegungstechniken bereitzustellen. Die Verwendung entsprechender Techniken hätte für das Erlernen eine höhere kognitive Belastung und die Anwendung zusätzliche Aufmerksamkeit erfordert. Weiterführend bestand die Idee, das Orientierungstracking der VR-Brille für ein identisches FoV zu deaktivieren. Der Vorschlag wurde jedoch verworfen, da die Interaktion realitätsnah und das gerade Halten des Kopfes erlernt werden sollte (Abs. 4.4). Des Weiteren hätte der Patient zum Vorbeugen von Cybersickness den Kopf in einer möglichst statischen Position halten müssen (Vergence-Fokus-Konflikt).

4.2 Trainingssystem

Für die Integration der Behandlungsansätze in die VR war es das Ziel, eine virtuelle Trainings- und Pausenszene mit einem geeigneten Trainingssystem zu konzipieren. Das System teilt sich in das Trainings- und Pausenkonzept auf und beschreibt die Planungen zum systematischen Ablauf des Trainings in den zwei VU. Weil die Behandlungsansätze eine hohe Anzahl repetitiver Wiederholungen vorsahen [9], sollte das Trainingssystem möglichst vielseitig und abwechslungsreich gestaltet sein. Die Idee bestand darin, mit der Anzahl der TE den Schwierigkeitsgrad in Form eines Trainingslevels zu erhöhen. Je TE sollte ein Trainingslevel absolviert werden. Ein Trainingslevel hatte sich aus einer Trainingszeit von 3×5 Minuten Trainingsszene und 3×1 Minuten Pausenszene zusammensetzen, sodass sich die Szenen alternierend abwechselten (T-P-T-P-T-P). Weil nicht sicher war, wie verträglich das VR-basierte Training sein wird, wurden kurze Zeitintervalle mit einer Gesamttrainingszeit von bis zu 30 Minuten vorgegeben. Zur Vorbeugung von Cybersickness

und dem Erhalt der Immersion sollte für die Szenenwechsel zwischen Trainings- und Pausenszene zudem ein geeigneter Übergang entwickelt werden.

Trainingskonzept

Das Trainingskonzept sollte den visuellen und kognitiven Fähigkeiten der Neglect-Patienten gerecht werden und eine direkte Überforderung vermeiden. Zum anderen sollte es nicht zu Langweile führen, sodass ein geeigneter Schwierigkeitsgrad benötigt wurde. Zusätzlich sollten in das Training Belohnungseffekte implementiert werden, die eine extrinsische Motivation hervorrufen. Basierend auf der 1. Aussage (Kpt. 4) zum klinischen Alltag war es zudem das Ziel, dem Patienten charakteristische Ausgleichsbewegungen abzugewöhnen, indem dem Patienten ein geeignetes Hilfstool zur Verfügung gestellt wird. Das 1. Hilfstool (Kopfhaltedefeedback) sollte ein Abweichen von der neutralen Kopfposition (Kopf gerade) visualisieren und eine Hilfestellung zum Zurückfinden zur neutralen Position bereitstellen.

Das Beförderungsprinzip. Mit der Integration eines visuelles Suchtraining (Explorationstraining) bestand die grundlegende Idee des Trainingssystems darin, zu beobachtende Objekte auf einem Fließband zu transportieren. Für das Wiedererlernen eines systematischen Suchmusters von ipsiläsional nach kontraläsional hatte der Transport der Gegenstände von rechts nach links zu erfolgen. Während der Patient seinen Kopf gerade hielt (neutrale Stellung), sollte die gesamte Szene zum Transport der Objekte in der Nutzerperspektive bzw. dem Gesichtsfeld sichtbar sein, sodass keine Notwendigkeit zum aktiven Drehen des Kopfes bestand. Das zu beobachtende Objekt sollte ununterbrochen transportiert werden und am Ende des Fließbandes für eine Nutzerbestätigung stehenbleiben. Zur Bestätigung sollte das Objekt in Summe für drei Sekunden fokussiert werden. Im Anschluss sollte das Objekt abtransportiert werden und ein neues Objekt im rechten Gesichtsfeld erscheinen. Alternative Ansätze, wie ein direkter Transportstopp bei Verlust des Blickkontaktes zum Objekt oder das Zurücksetzen der Blickdauer bei der Nutzerbestätigung wurden als demotivierend und störend für den Trainingsablauf angesehen. Die Summation der Blickdauer verfolgte zudem die Idee, dem Patienten ein zwischenzeitliches Abweichen des Blickpunktes zu ermöglichen. Die Anforderungen sahen es vor, für den Transport der Objekte ein System zur Steuerung des Fließbandes zu entwickeln. Neben der Umsetzung der Nutzerbestätigung sollte zudem ein Eye-Tracking Interaktionskonzept implementiert werden, das das Objekt bei Blickkontakt optisch hervorhebt.

Trainingslevel

Zu Beginn jedes Trainingslevels sollte der Patient begrüßt werden. Um einer Überforderung durch einen direkten Trainingsstart vorzubeugen, musste der Start des Trainings

bzw. Fließbandes bestätigt werden. Für die Umsetzung der Trainingslevel wurden geeignete Schwierigkeitsparameter benötigt. Die Tabelle 4.1 fasst gesammelte Vorschläge für Schwierigkeitsparameter und Tabelle 4.2 Möglichkeiten zum Hervorheben eines Objektes (Highlighter) mithilfe eines Assets zusammen. Für das Hervorheben des Objektes wurde sich auf ein rein visuelles Feedback geeinigt, welches das begutachtete Objekt mit einer farblichen Umrandung hervorhebt. Die Objekthervorhebung sollte nicht zu aufdringlich sein und eine Identifikation durch Einfärbungen oder unrealistische Objektbewegungen und -skalierungen nicht erschweren. Das rein visuelle Feedback wurde als ausreichend betrachtet, sodass keine weiteren Hervorhebungsarten benötigt wurden.

Tabelle 4.1: Auflistung der gesammelten Schwierigkeitsparameter zur Konzeptionierung von Trainingsleveln.

Bereiche	Schwierigkeitsparameter
Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • Objektgröße • Kameraabstand (Fließbandlänge) • Geschwindigkeit (Objekte) • Transport mehrerer Objekte
Variationen	<ul style="list-style-type: none"> • Fließbandhöhe (Horizontal) • Fließbandkrümmung (3D)
Ablenkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Störgeräusche (Maschinen)

Bei der Parameterauswahl wurde eine geeignete *Objektgröße* mit einen festen Kameraabstand zum Fließband (Nutzerposition), Höhenunterschiede (Fließbandhöhe) sowie eine kontinuierliche *Geschwindigkeit* entschieden. Für den Schwierigkeitsparameter *Fließbandhöhe* bestand die Idee, das Verfolgen des Objektes durch die Veränderung der horizontalen Höhe des Fließbandes (Steigung/Gefälle) zu erschweren. Die Fließbandkrümmung diente dazu den Objekttransport unter Ausnutzung der Tiefe dreidimensional zu gestalten, sodass das Objekt sich der Betrachterposition nähert oder sich von dieser weiter entfernt. Für die Auswahl wurde die Variation der Fließbandhöhe als ausreichend betrachtet. Als weiterer Schwierigkeitsgrad wurde der *Transport mehrerer Objekte* ausgewählt. Der Parameter bezeichnete den Transport von mehr als zwei Objekten durch die Verwendung von einem Zielobjekt und mehreren falschen Objekten. Die Bewegung mehrerer Fließbandobjekte von rechts nach links hatte das Ziel, mit einem gleichmäßigen Bewegungsfluss die OKS in den Trainingsraum zu integrieren. Das Zielobjekt stellte das kontinuierlich zu beobachtende Objekt dar, welches bei Blickkontakt durch eine grüne Objektumrandung hervorgehoben werden sollte. Bei dem Zielobjekt handelte es sich immer um das erste Objekt, das den Eingang eines Fließbandes verlässt. Zur Identifikation sollte das aktuelle Zielobjekt in der VU visualisiert werden. Weitere, sog. falsche Objekte eines Objektdurchgangs (Blockes) sollten nach Möglichkeit nicht angeschaut und bei Blickkontakt rot umrandet werden. Auf

dem Fließband durfte sich zu jedem Zeitpunkt lediglich ein Zielobjekt befinden. Um die Objektdifferenzierung zu erleichtern, sollte dem Patienten hierbei ein 2. Hilfstool zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 4.2: Darstellung der Ideen für die Objekthervorhebung bei Blickkontakt.

Bereiche	Hervorhebungsart
Farbgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Einfärbung • Teilfärbung • Umrandung
Bewegung	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation
Skalierung	<ul style="list-style-type: none"> • Objektvergrößerung/-verkleinerung
Akustik	<ul style="list-style-type: none"> • Blickkontakt • dauerhaft

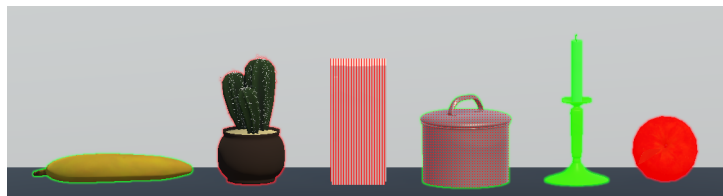


Abbildung 4.1: Die Hervorhebungsarten der Farbgebung werden durch die Verwendung eines Assets an exemplarischen Alltagsgeometrien [41] visualisiert.

Zum Ende jedes Trainingslevels sollte dem Patienten in der Trainingsszene seine Trainingsperformance angezeigt werden. Hierfür war es die Anforderung, geeignete Bewertungsparameter zu identifizieren. Die Ergebnisse sollten in einer einfachen Darstellungsform möglichst verständlich visualisiert werden. Mit der Darstellung der Trainingsperformance hatte ein erneuerter Szenenwechsel in den Trainingsraum zu erfolgen (T-P-T-P-T-P-T).

Tutorials

Aufgrund der personalintensiven Patienteneinweisung (*Aussage 2*, Kpt. 4) ist die Anforderung für eine computerbasierte Trainingseinweisung entstanden. Eine automatische Einweisung durch Tutorials sollte die Interaktion, Hilfstools und das Trainingsprinzip der verschiedenen Trainingslevel erklären. Die Anleitungen sollten möglichst patientengerecht in Form von Text und Sprache erfolgen. Für einen Unterhaltungswert und eine hohe Immersion sollten die Anleitungen in ein Storytelling eingebettet werden. Durch das Erzählen einer Geschichte sollte das Training in einen sinnvollen Kontext gestellt werden. Weiterhin setzte die Idee einen ersten Schritt in Richtung eigenständiges Hometraining und stellte eine identische Einweisung für Patienten sicher (Vergleichbarkeit).

Für die Trainingsbewertung bestand die Überlegung, eine feste Objektanzahl oder Trainingszeit zu verwenden. Um die Vergleichbarkeit zwischen Patienten zu gewährleisten, wurde sich für eine feste Trainingsdauer entschieden, wobei nach Ablauf der Trainingszeit eine letzte Nutzerbestätigung durchzuführen war.

Pausenkonzept

Das Pausenkonzept hatte das Ziel, das therapeutische Verfahren der OKS in die VR zu integrieren. Die Anforderung bestand darin, sich von rechts nach links bewegende Geometrien zu beobachten. Für ein abwechslungsreicheres Training sollten das virtuelle OKS-Objekt und Sounds zwischen den Iterationen variiert werden. Des Weiteren sollte die Fluggeschwindigkeit der Objekte nicht zu langsam sein.

4.3 VR-Umgebungen

Für das Trainingskonzept wurden ökologisch valide und realitätsnahe VU benötigt.

Die Trainingszene. Das Trainingskonzept wurde schnell in den Kontext mit einem Supermarkt zum Transport von Lebensmitteln auf einem Kassenband oder einer Fabrikhalle zur Beförderung von Gegenständen gebracht. Die ET-Interaktion in einem größeren Abstand zum Ziel (extrapersonaler Raum) mit dem Transport über eine längere Strecke resultierte für den Supermarkt in der Vorstellung eines unrealistisch langen Kassenbandes. Da sich in einem Supermarkt meist viele optisch markante Artikel befinden, die die Aufmerksamkeit außerhalb des Fließbandes auf sich ziehen, wurde der Kontext zu einer Fabrikhalle festgelegt. Abb. 4.2 a stellt den geplanten Aufbau der Fabrikhalle in der Draufsicht dar. Das Kamera-Icon symbolisiert die Position des Nutzers vor einem Fließband. Basierend auf der 3. Aussage (Kpt. 4) sahen spätere Anforderungen es vor, eine freundlichere Umgebung in Anlehnung an einen Wohnbereich bereitzustellen. Abb. 4.2 b stellt den Entwurf eines kleineren Trainingsraumes in Anlehnung eines Wohnbereiches dar. Hierfür bestand die Notwendigkeit, geeignete Geometrien bereitzustellen. Um einen Wiedererkennungswert und persönlichen Bezug zu den transportierten Objekten herzustellen, sollten die verwendeten Geometrien einen Bezug zu den Aktivitäten des täglichen Lebens aufweisen. Des Weiteren wurde ein optischer Ausgang durch die Bereitstellung einer Tür-Geometrie und eine optische Bereichsabgrenzung von der Position des Betrachters zum Raum benötigt.

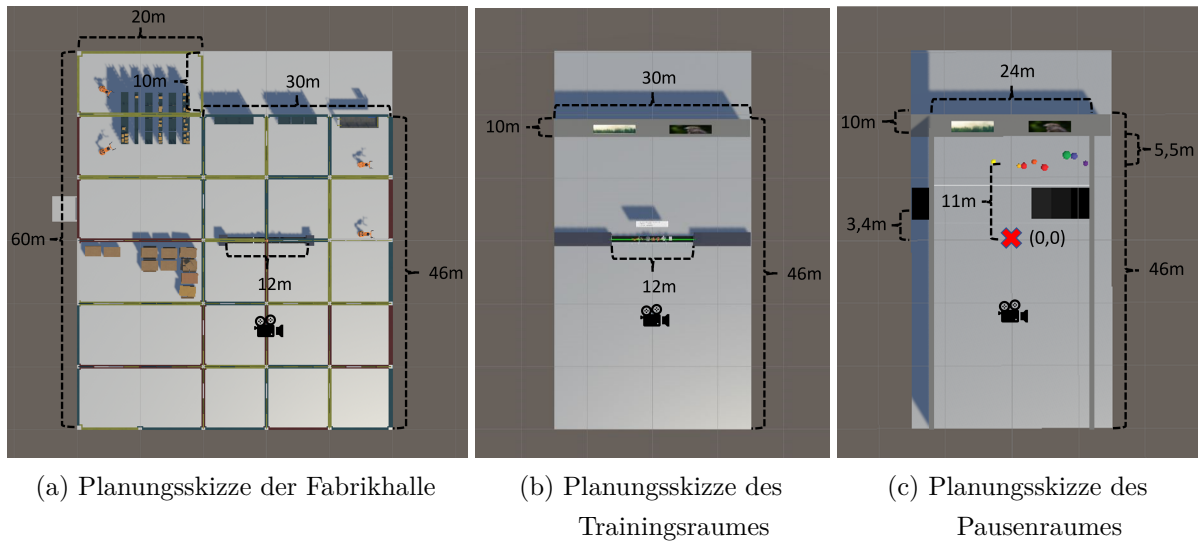


Abbildung 4.2: Illustration der bemaßten Skizzen zur Trainingsszene (Fabrikhalle und Trainingsraum) und Pausenszene (Pausenraum) in der Draufsicht in Metern.

Die Pausenszene. Die Pausenszene sollte eine entspannende Atmosphäre vermitteln. Das Abspielen von Naturgeräuschen und Entspannungsmusik sollte zu diesem Zweck beitragen. Für eine VU mit einem Naturbezug hatte der klinische Partner die Idee, den Patienten vor einen Fluss oder Wolken zu platzieren, während er vorbeifliegende Schmetterlinge, Vögel oder Kugeln beobachtet.

Inspiziert von der Idee von Yasuda et al. bestand ein anderer Entwicklungsansatz darin, die OKS-Objekte durch einen bewegten Vorhang in einem geschlossenen Raum zusätzlich zu verdecken, sodass die Aufmerksamkeit mit nach links gelenkt wurde. Abb. 4.2 c stellt den Planungsaufbau des Entwicklungsansatzes in der Draufsicht dar. In der Darstellung wird der Nullpunkt des Koordinatensystems (rotes Icon), der schwarze Vorhang und der Abstand zu den OKS-Objekten dargestellt.

4.4 Hilfestellungen

Für das Training sollte dem Patienten bei Bedarf eine geeignete Unterstützung zur zielgerichteten Koordination von Augen- und Kopfbewegungen zur Verfügung gestellt werden. Die Idee war es, die Hilfestellungen erst nach einer gewissen Zeit bereitzustellen, sodass die Möglichkeit bestand, eine falsche Kopfposition selbstständig zu korrigieren oder das Zielobjekt eigenständig mit den Augen zu lokalisieren.

1. Hilfstool

Das Kopfhaltedefeedback (1. Hilfstool) sollte durch visuelle und akustische Hinweise ein Abweichen von der Neutralstellung signalisieren und durch eine Hilfestellung das Zurückführen des Kopfes in eine neutrale Stellung erleichtern. Verwendete Hinweise sollten leicht zu verstehen sein. Zum Erfüllen der Anforderung sollten in einem ersten Schritt verschiedene prototypische Entwicklungsansätze gegenübergestellt werden.

2. Hilfstool

Um die Objektdifferenzierung und Lokalisation zu erleichtern, sollte das visuelle Suchtraining für die Beachtung des Zielobjektes auf der kontraläsionalen Seite durch einen visuellen Hinweis ergänzt werden (2. Hilfstool).

4.5 Datenerfassung

Für die Beurteilung der Trainingsperformance und des Nutzerverhaltens wurde die Dokumentation relevanter Daten benötigt. Die Datenerfassung sollte in drei separate Bereiche untergliedert werden.

- **1. Kopffrotationsdaten (*Head Rotation*):** Die durchgehende Dokumentation der Kopfstellung
- **2. Event-Daten:** Die Dokumentation etwaiger Ereignisse im Programmablauf und der Interaktion des Nutzers
- **3. Eye-Tracking Daten:** Die Dokumentation geeigneter ET-Parameter, um Rückschlüsse auf die Okulomotorik und Blickrichtung der Augen ziehen zu können

Die bereichsspezifischen Daten sollten in separaten Dateien in einem geeigneten Dateiformat bereitgestellt werden. Die Einträge sollten einen einheitlichen Zeitbezug (Uhrzeit und Datum) und eine Referenz zum Programmmodus aufweisen. Weiterhin sollte eine eindeutige Zuordnung der bereichsspezifischen Einträge zueinander möglich sein.

4.6 Therapeutenoberfläche

Für die Bedienung der Software durch Therapeuten und medizinische Hilfskräfte wurde eine geeignete Benutzeroberfläche mit spezifischen Funktionalitäten benötigt. Die Benutzerschnittstelle sollte übersichtlich gestaltet sein, eine simple Interaktion und Datenverwaltung sowie alle notwendigen Einstellungen zur Durchführung des Trainings bereitstellen. Aus der

4. *Aussage* (Kpt. 4) entstand die Anforderung, das Programm pausieren zu können, sodass der Patient bei Bedarf eine Pause einlegen kann. Ein gestarteter Programmmodus (z.B. ein Trainingslevel) sollte zu diesem Zweck abgebrochen werden können, wobei sämtliche bis zu diesem Zeitpunkt erfassten Daten dokumentiert werden sollten. Weiterhin sollte der Therapeut in der Lage sein, eine durch den Patienten zu bewältigende Aufgabe über die Therapeutenfläche zu bestätigen, sodass bei einem Misslingen das Training fortgesetzt und die Demotivation niedrig gehalten werden kann. Zusätzlich sollte die Möglichkeit bestehen, mit dem Überspringen der Trainings- bzw. Pausenzeit unmittelbar in die nächste Szene zu wechseln. Mit Verwendung der HTC-Vive Pro Eye bestand zudem die Anforderung, die ET-Kalibrierung bedienen zu können.

Expertenfragebogen

Um die Erfolgsaussichten des VR-Trainingsystems abzuschätzen, sollte zum Ende des iterativen Entwicklungsprozesses zusätzliches klinisches Feedback erfasst werden. Für die Befragung der Experten des UKL sollte ein geeigneter qualitativer Fragebogen entwickelt werden. Die Bewertung zielte darauf ab, Stärken und Schwächen der entwickelten Features herauszufinden, um Schwachstellen anzupassen oder notwendige Ergänzungen durchzuführen.

Auflistung der Anforderungen

Im folgenden werden die im Konzept definierten Anforderungen an die VR-Trainingsanwendung als Übersicht dargestellt.

1. Entwicklung geeigneter VU.
 - Bereitstellung geeigneter Geometrien.
 - Implementierung der Trainings- und Pausenumgebung.
2. Implementierung geeigneter Hilfestellungen.
 - Entwicklung eines Features, um
 - * dem Patienten eine Hilfestellung zu geben, seinen Kopf zurück in eine neutrale Position zu bringen.
 - * das visuelle Suchtraining durch einen Hinweis auf der kontraläsionalen Seite zu unterstützen.

3. Entwicklung eines Trainingssystems.

- Ein System zur Steuerung von Fließbandobjekten.
- Eine ET-Interaktion mit optischem Feedback.
- Tutorials für die Trainingseinweisung.
- Trainingslevel mit einem geeigneten Schwierigkeitsgrad.
- Belohnungseffekte.
- Ein System für den Trainingsablauf.
- Identifikation geeigneter Bewertungsparameter für die Visualisierung der Trainingsperformance.
- Szenenübergänge um Cybersickness vorzubeugen.
- Ein Ablauf zur Steuerung der OKS-Objekte.

4. Implementierung einer Therapeutenoberfläche.

- Der Therapeut soll in der Lage sein,
 - * notwendige Einstellungen vorzunehmen (z. B. Programmmodus).
 - * die Anwendung zu bedienen.
 - * die ET-Kalibrierung der HTC-Vive Pro Eye durchzuführen.

5. Entwicklung einer Datenerfassung.

- Kopffrotationsdaten.
- Ereignisdaten zum Trainingsablauf.
- Eye-Tracking Daten.

5 Implementierung

Mit der Implementierung der Anforderungen wird in diesem Kapitel der Entwicklungsprozess hin zur finalen VR-Trainingsanwendung beschrieben. Obwohl die im Konzeptkapitel genannten Bereiche (Programmbereiche) zeitlich parallel entwickelt wurden, soll zum besseren Verständnis die Entwicklung jedes Bereiches einzeln als lineare Abfolge wiedergegeben werden. Mit dem Aufzeigen prototypischer Entwicklungsansätze werden anfängliche Ideen, iterative Bewertungen, getroffene Entscheidungen und gewonnene Erkenntnisse möglichst nachvollziehbar wiedergegeben. Hierbei kann aufgrund der Komplexität und vielfältigen Zusammenhänge aller Programmbereiche die VR-Trainingssoftware nur in vereinfachter Form wiedergegeben werden.

Zu Beginn wird die für Implementierung verwendeten Software und Hardware erläutert. Im Anschluss wird der Entwicklungsprozess zur Gestaltung der VU wiedergegeben. Hierbei wird für die Pausenszene übersichtlichkeithalber bereits die Umsetzung des Pausenkonzeptes mit der OKS dargelegt. Darauffolgend wird die Entwicklung und Umsetzung des Trainingskonzeptes mit der finalen Gestaltung der Trainingslevels erläutert. Fortführend wird der Prozess zur Entwicklung der Hilfestellungen wiedergegeben. Für die Dokumentation des Trainings wird auf die Datenerfassung eingegangen. Für die Bedienung der Software wird zuletzt die Therapeutenoberfläche erklärt.

In den späteren Iterationen des Entwicklungsprozesses wurden basierend auf den qualitativen Expertenmeinungen Programmänderungen durchgeführt. Die Hinweise wurden durch einen eigens entwickelten Fragebogen erfasst (Abb. [A.5](#) - [A.7](#)). Während jegliche Fragen (bzw. Antworten) zur Bewertung des Programmes im Ergebnisteil der Arbeit erläutert werden, werden Verbesserungsvorschläge bereits in der Implementierung zum Ende eines Programmbereiches dargelegt. Weil die Meinungen sich z. T. widersprachen oder sich im Konzept bereits bestimmte Ideen verworfen wurden (z. B. Variation der Geschwindigkeit) werden lediglich die zur Verbesserung umgesetzten Vorschläge in der Implementierung erläutert.

5.1 Software

5.1.1 Unity

Für die Entwicklung des VR-Trainingssystems wurde die Entwicklungsplattform Unity (Version 2020.3.37f1) mit der Programmiersprache C# verwendet. Die Spiele-Engine gehört zu den führenden Softwarelösungen zur Entwicklung von interaktiven 3D-Inhalten für den Bereich Smartphones, Desktop, AR und VR.¹⁷ Mit der HTC-Vive Pro Eye wurde für den Bereich VR die Software SteamVR für das SteamVR-Tracking verwendet.

5.1.2 Konstruktionssoftware

Für die Modellierung und Bearbeitung von Geometrien wurde geeignete CAD-Software (*computer aided design*, CAD) benötigt. Die Software Solid Edge wurde von Siemens entwickelt und bietet ein umfangreiches Portfolio von Softwaretools für die 3D-Konstruktion, Simulation und Fertigung.¹⁸ Die kostenlose Open-Source Software Blender bietet Softwaretools für die 3D-Modellierung, Rigging, das Erstellen von Animationen und vieles mehr.¹⁹

5.1.3 Software Development Kit

Für die Implementierung der ET-Interaktion mit der HTC Vive Pro Eye standen zwei *Software Development Kits* (SDK) zur Verfügung. Das *sRanipal Unity SDK*²² von Vive und das *Tobii XR SDK*²¹ ermöglichen mit der Bereitstellung von Programmbibliotheken die Anwendungsentwicklung und den Zugriff auf die ET-Daten des HMD.²²

Bei der ET-Interaktionsmethode wird ein Blickstrahl der Augen (*ray-based interaction*) von einem Ursprung aus in eine Richtung ausgesendet. Trifft der Strahl auf ein Objekt in der Szene, kann über einen Kollider mit definierter Größe die Kollision (Schnittmenge) registriert werden, wobei die Kollidergröße idealerweise der Objektgröße (Geometrie) entspricht. Die Zuverlässigkeit dieser Interaktionsmethode variiert aufgrund von anatomischen Faktoren, dem aktuellen Sitz des HMD auf dem Kopf und der Abstraktion zur Realität mit dem Fokussieren von Pixeln auf einem Display. Als Folge wird bei der Fokussierung

17: Unity, <https://investors.unity.com/overview/default.aspx>

18: Solid Edge, <https://solidedge.siemens.com/de/>

19: Blender, <https://www.blender.org/about/>

20: VIVE Eye and Facial Tracking SDK, <https://developer.vive.com/resources/vive-sense/eye-and-facial-tracking-sdk/>

21: Tobii Core API, <https://developer.tobii.com/xr/develop/unity/documentation/api-reference/core/#tobiixr>

22: Tobii XR SDK, <https://developer.tobii.com/xr/develop/unity/>

eines Objekts z. T. kein Blickkontakt registriert. Ein willkürliches Vergrößern des Kolliders führt dazu, dass Kollisionen erkannt werden, obwohl der Nutzer das Objekt nicht anschaut. Ein dynamisches Anpassen der Kollidergröße in Abhängigkeit des Abstandes von der Nutzerposition zum Objekt gestaltet sich aufwendig, weshalb Tobii einen Machine Learning Algorithmus einsetzt. Das *Tobii Gaze-2-Object-Mapping* (G2OM) basiert auf dem Training von Millionen Datenpunkten und verspricht laut Tobii AB eine vergleichsweise robustere ET-Selektionsmethode (Abb. A.3 b) ohne die Variation der Kollidergröße (Abb. A.3 a).²³ Weil das *sRanipal Unity SDK* keinen vergleichbaren Ansatz geboten hat, wurde zu Beginn des Entwicklungsprozesses das *Tobii SDK* mit dem G2OM ausgewählt.

5.2 Hardware

Die Entwicklung der VR-Trainingsanwendung und die Durchführung der Probandenstudie (ohne Neglect) wurde an einem Windows 10 Desktop Computer mit einem Intel Core i7-9700 Prozessor mit bis zu 3.00 GHz, einer NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti Grafikkarte und 32 GB Arbeitsspeicher durchgeführt. Die Durchführung der Patientenstudie (mit Neglect) erfolgte an einem Windows Notebook mit einem Intel i7-9700 Prozessor, einer Nvidia GeForce RTX 2070 Grafikkarte mit 8GB und 16GB Arbeitsspeicher. Beide Geräte wurden im Rahmen des iterativen Entwicklungsprozesses zum Testen der Software verwendet.

5.3 VR-Umgebungen

Für den iterativen Entwicklungsprozess werden im folgenden Abschnitt die Entwicklungsansätze und das Ergebnis der VU erläutert.

5.3.1 Trainingsszene

Fließbandgeometrien

Um das Beförderungskonzept (zum Transport der Objekte) in die VU zu implementieren, war es notwendig, geeignete Geometrien von Fließbändern bereitzustellen. Weil sich nach ausführlicher Recherche keine passenden Geometrien finden ließen, wurden diese eigenständig modelliert. Um realitätsnahe Geometrien zu erstellen, wurden Maßstäbe vorhandener Förderbänder zur Orientierung (Breite und Höhe) genutzt.²⁴ Als grundlegende

23: Tobii G2OM, <https://developer.tobii.com/xr/solutions/tobii-g2om/>

24: Kleinförderbänder, <https://www.norelem.com/il/de/Produkte/Produkt%C3%BCbersicht/F%C3%B6rder-und-Bewegungstechnik/95000-F%C3%B6rder-und-Bewegungstechnik/Kleinf%C3%B6rderb%C3%A4nder/95300-Kleinf%C3%B6rderb%C3%A4nder-mit-innenliegendem-Antrieb.html>

Geometrie wurden drei Bauteile in Solid Edge modelliert. Neben einem Tischgestell mit Bohrungen wurde ein Fließband sowie ein Stift mit Bohrung und Fortsatz erstellt. Für die Höhe der Tischbeine wurde ein Wert von 80cm gewählt. Abb. A.4 stellt die drei Bauteile und Abb. 5.1 c den Zusammenbau dar.

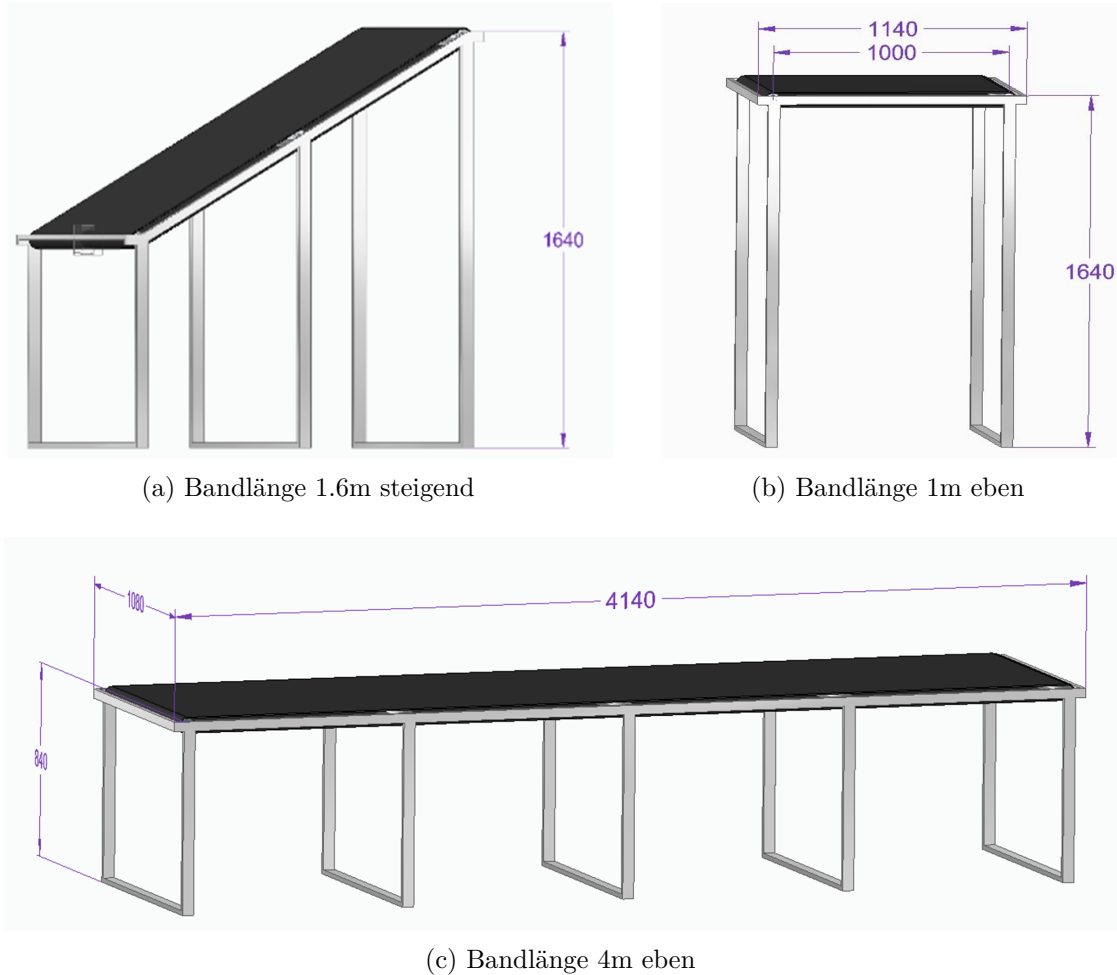


Abbildung 5.1: Exemplarische Darstellung von drei modellierten Fließbandgeometrien. Neben einem langen (4140mm x 1080mm x 840mm) und einem kurzen (4140mm x 1080mm x 1640mm) ebenen Fließband wird ein Fließband mit Steigung (30°) zum Transport auf das höhere Fließband dargestellt. Alle Bemaßungen sind in Millimetern angegeben.

Um die Anforderung des Schwierigkeitsgrades zur variierenden Fließbandhöhe umzusetzen, wurden weitere Geometrien benötigt. Damit ein Objekt auf einer Strecke in unterschiedlicher Fließbandhöhe transportiert werden konnte, wurden zwei kürzere Fließbänder mit einer Steigung bzw. einem Gefälle von 30° erstellt (Abb. 5.1 a). Passend dazu entstand ein ebenes Fließband mit einer Bandlänge von 4m. Bei der Gestaltung der Trainingslevel zeigte sich, dass für eine flexible Gestaltung der Fließbandhöhe über eine kurze Strecke Fließbänder mit geringerer Länge benötigt werden. Infolgedessen wurden die ebenen Fließbänder mit der Hälfte (Bandlänge 2m) und einem Viertel (Bandlänge 1m, Abb. 5.1

b) der bisherigen Bandlänge erstellt, sodass vier weitere Geometrien entstanden. Abb. stellt exemplarisch drei modellierte Fließbandgeometrien mit der Bemaßung in mm dar. Durch eine Formatumwandlung in Blender konnten die Geometrien zur Gestaltung der Trainingsszene in Unity importiert werden.

Fließbandobjekte

- Tromp et. al [41] stellen eine Sammlung von 124 realistischen 3D-Haushaltsgeometrien unentgeltlich zur Verfügung. Die standardisierten Objekte wurden hinsichtlich der Erkennbarkeit, Vertrautheit, Details und der Häufigkeit der Verwendung in einer Studie validiert. Die Teilnehmer wurden nach dem Alter in die Gruppe jung oder alt eingeteilt. Nachdem ein Objekt begutachtet wurde, konnte einer Kategorie mit einem Schieberegler ein Wert zwischen 1 (überhaupt nicht) und 100 (sehr gut) zugeordnet werden. Die Ergebnisse beider Gruppen (jung und alt) zeigten hohe Werte (Mittelwert > 78) für die Erkennbarkeit der Objekte. Die Teilnehmer waren außerdem mit den meisten Objekten vertraut (Mittelwert > 78), sodass die Autoren die *OpenVirtualObjects* für eine VR-basierte Forschung, Training und Testung im Kontext mit v.a. räumlichen Erinnerungsaufgaben empfehlen.

Für die VR-Trainingsanwendung wurden geeignete Objekte mit einem Bezug zu den Aktivitäten des täglichen Lebens benötigt. Als Fließbandobjekte wurden aus der Sammlung von Tromp et al. 45 geeignete 3D-Objekte ausgewählt. Der Alltagsbezug der Objekte ging mit der Annahme einher, dass eine Erkennbarkeit und Vertrautheit der Geometrien für die Objektidentifizierung und Lokalisation im Explorationstraining von Vorteil sind.

Fabrikhalle

Nach einer Recherche wurde in einem ersten Ansatz eine Fabrikhalle mit geeigneten Geometrien und Texturen gestaltet. Die Fließbandgeometrien wurden mit einem Ein- und Ausgang in der VU platziert (Abb. 4.2 a). Die Bewertung durch den klinischen Partner ergab, dass die VU deutlich zu groß und unfreundlich gestaltet war, wobei die Umgebung mit Regalen, Kisten und Robotern die Aufmerksamkeit auf sich ziehen konnte. Aufgrund des offenen Ein- und Ausgangs wurde die Beförderung der Objekte zudem als unrealistisch betrachtet. Infolgedessen entstand die Anforderung, eine VU in Anlehnung an einen Wohnbereich mit Wandbildern bzw. Postern zu gestalten.

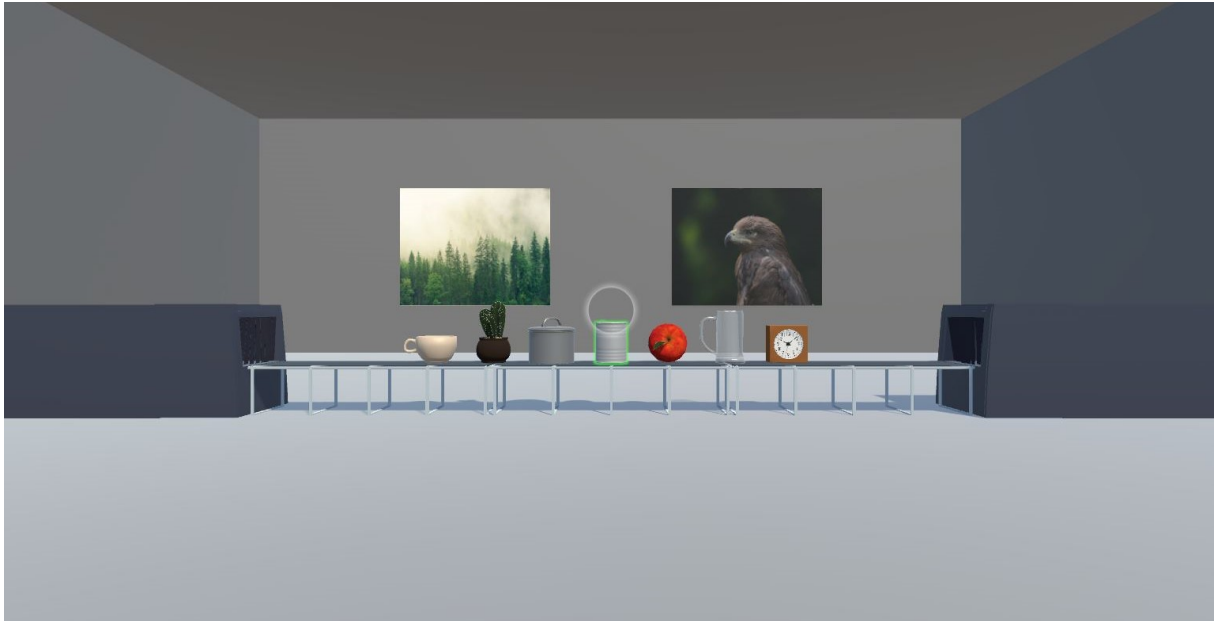


Abbildung 5.2: Darstellung der Nutzeransicht für die angepasste Umgebung in Anlehnung an einen Wohnbereich.

Der kleinere Raum verfügte über verlängerte Ein- und Ausgänge, die mit den Wänden abschlossen, sowie zwei Poster (Grafiken) um eine bessere Atmosphäre zu erzeugen. Eine iterative Bewertung der Projektpartner ergab das, dass Bild des Adlers einen zu markanten Hinweis in der rechten Raumhälfte darstellte. Als Resultat hätte der Reiz auf der ipsiläsionalen Seite die Aufmerksamkeit des Patienten zu sehr auf sich gezogen. Infolgedessen wurde ein anderes Motiv benötigt. Durch die Beleuchtung des Raumes erschien zudem die rechte Wand dunkler, sodass sich der Farbton schwer vom Ausgang des Fließbandes unterscheiden ließ. Weiterhin sollte die Länge des Raumes erneut verkleinert werden und eine Tür als optischer Ausgang sowie eine rechteckige Plattform als optische Bereichsabgrenzung implementiert werden. Um sich einem Wohnbereich weiter anzunähern, wurde zudem ein anderer Farbton der Wand gewählt. Außerdem wurde eine Textur zur Darstellung eines virtuellen Parkettbodens verwendet.

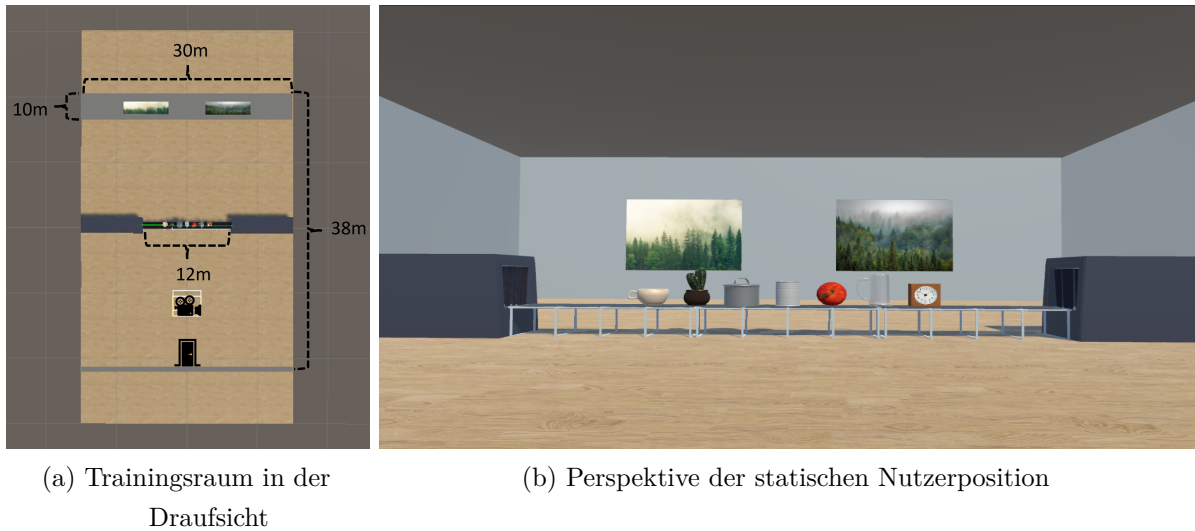


Abbildung 5.3: Darstellung der Trainingsszene in der Draufsicht (a) und der Perspektive des Nutzers (b). Durch Icons wird die Position des Nutzers (Kameraicon) und einer virtuellen Tür (Türicon) visualisiert.

Durch ein neues Postermotiv wurde das markante Merkmal im Bild entfernt. Das Anpassen der Beleuchtung führte zudem zu einem besseren Kontrast zwischen Wand und Ausgang. Um die Nutzerposition räumlich abzugrenzen, wurde eine andere Textur für die Visualisierung eines Parkettbodens verwendet. Für die Hervorhebung der Raumabgrenzung wurde außerdem ein *SteamVR* Skript modifiziert, sodass sich eine geeignete Farbgebung, Rahmengröße und -breite definieren ließen.



Abbildung 5.4: Gestaltung des virtuellen Trainingsraumes mit der abgegrenzten Nutzerposition, den Fließbandelementen und Postern im Hintergrund.

Abb. 5.3 stellt den Aufbau des Trainingsraumes in der Draufsicht und die Perspektive der statischen Nutzerposition dar. Abb. 5.4 gibt einen Überblick über die räumlich abgegrenzte Nutzerposition.

5.3.2 Pausenszene

Die Pausenszene sollte das therapeutische Verfahren der OKS beinhalten und mit einer entspannenden Atmosphäre einen Ausgleich zum visuellen Suchtraining im Trainingsraum darstellen.

Virtuelle Naturlandschaft (1. Entwicklungsansatz)

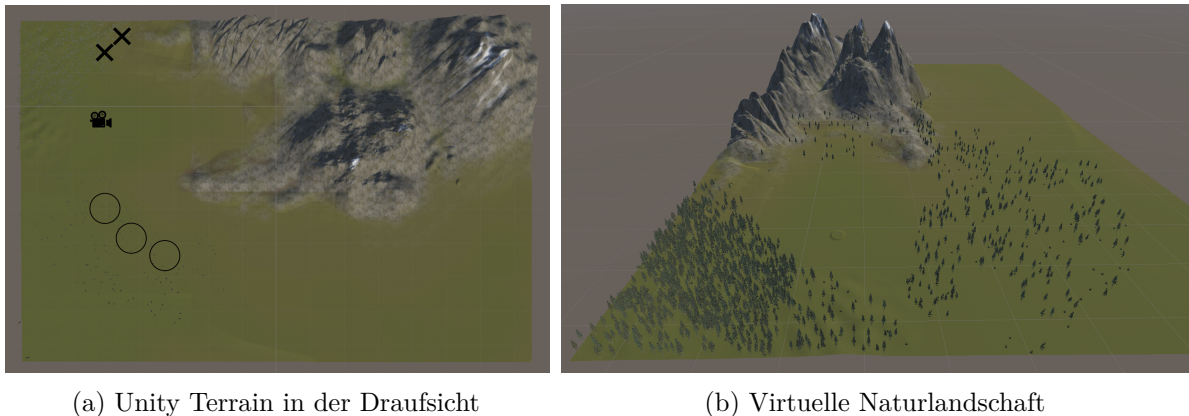


Abbildung 5.5: Raumanordnung der Basisstationen für das SteamVR-Tracking der HTC Vive Pro Eye in der Single und Multi-User Variante

Der erste Entwicklungsansatz verfolgte das Ziel, für den Patienten eine VU in Form einer Naturlandschaft zu erstellen. Die virtuelle Natur sollte eine möglichst naturgetreue Darstellung eines Gebirges mit Bäumen, Wiesen, Gräsern und Vögeln beinhalten. Indem die Vögel von rechts nach links flogen, sollte die OKS in die VU integriert werden. Für die Implementierung wurde das Unity Terrain mit geeigneten Features zum Erstellen von virtuellen Landschaften und Geländeumgebungen genutzt. Als erster Schritt wurde die Höhe des Geländes (*heightmap*) mit einem Pinselwerkzeug gestaltet, sodass ein Gebirge in einer flachen Umgebung mit einer erhöhten Plattform als Nutzersichtpunkt (Kamerasymbol Abb. 5.5 a) entstanden ist. Durch die Verwendung von Texturen und Assets (Bäume und Blumen) wurde eine landschaftliche Umgebung gestaltet (Abb. 5.5 b). Ein weiteres Asset stellte Geometrien von Vogelarten und die automatische Flugbewegung zu einem Ziel zur Verfügung. Durch die Modifikation und Erweiterung des Assets ließen sich drei unterschiedliche Startpositionen und das direkte Ausblenden der Geometrien bei Erreichen des Zieles definieren. Abb. 5.5 a stellt den Aufbau der Pausenszene in der Draufsicht dar. Zum Start der VU wurden die Vögel nacheinander an den drei Startpositionen (schwarzer Kreis) eingeblendet und erreichten die beiden Ziele (schwarze Kreuze) erst nach einer gewissen Zeit. Abb. 5.6 stellt die statische Nutzerposition aus der Kameraperspektive dar.

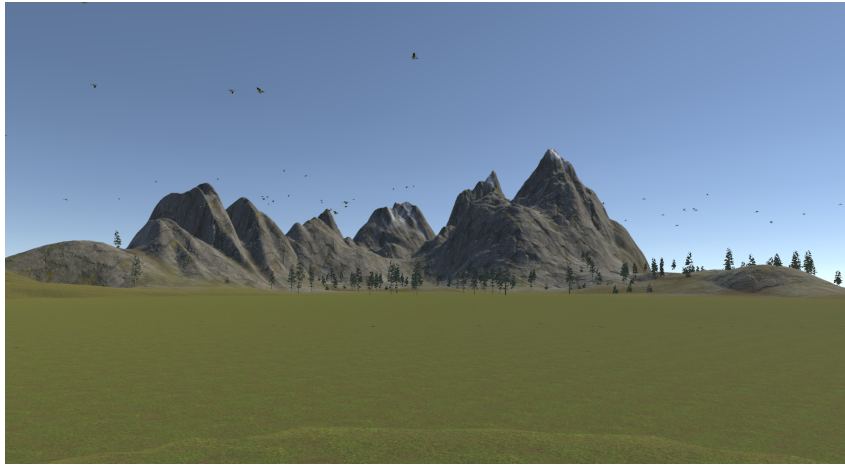


Abbildung 5.6: Darstellung der Kameraperspektive mit Ausblick auf vorbeifliegende Vögel als OKS-Objekte und ein Gebirge im Hintergrund.

Der Entwicklungsansatz der virtuellen Natur wurde als ungeeignet betrachtet, da die VU zu viel Ablenkung bot. Die landschaftliche Darstellung zog mit dem Berg als markante Landschaftsform zu viel Aufmerksamkeit auf sich. Vergleichsweise war die Darstellung der OKS-Objekte in Form von Vögel zu klein und nicht markant genug. Des Weiteren war die Objektdichte bzw. -anzahl für die OKS zu gering. Die Vogelschwärme flogen nur für einen kurzen Zeitraum an dem Nutzer vorbei, bevor es zu einer längeren Pause kam. Aufgrund der uneingeschränkten Sicht des Nutzers musste zudem eine weite Flugstrecke gewählt werden, sodass die Vögel aufgrund ihrer Objektgröße am Horizont verschwanden. Dies ging mit dem Nachteil einher, dass sich die OKS-Objekte unnötig lange in der VU befanden und Rechenressourcen benötigten. Als Folge wurde sich mit den gesammelten Erkenntnissen einem anderen Entwicklungsansatz gewidmet.

Bewegter Vorhang (2. Entwicklungsansatz)

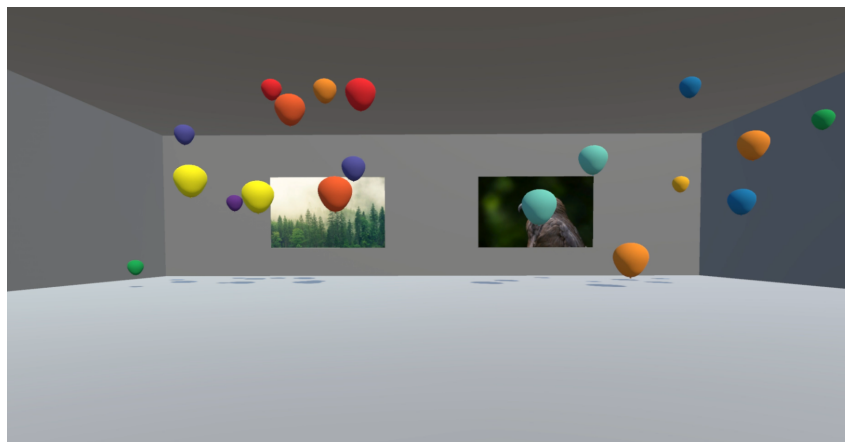


Abbildung 5.7: Darstellung des 2. Entwicklungsansatzes zur OKS mit fliegenden Luftballons.

Inspiziert von Yasuda et al. (3.1) sollte ein bewegter Vorhang die Aufmerksamkeit des Nutzers nach links lenken. Zudem verfolgte der zweite Entwicklungsansatz das Ziel, eine geeignete OKS zu entwickeln. Für die VU wurde eine Version des Trainingsraumes ohne Fließbandgeometrien verwendet (4.2 c). Die Auswahl des OKS-Objektes fiel für einen Wiedererkennungswert auf eine Luftballon-Geometrie. Zum Hervorheben sollten dem Objekt markante Farben zugeordnet werden.

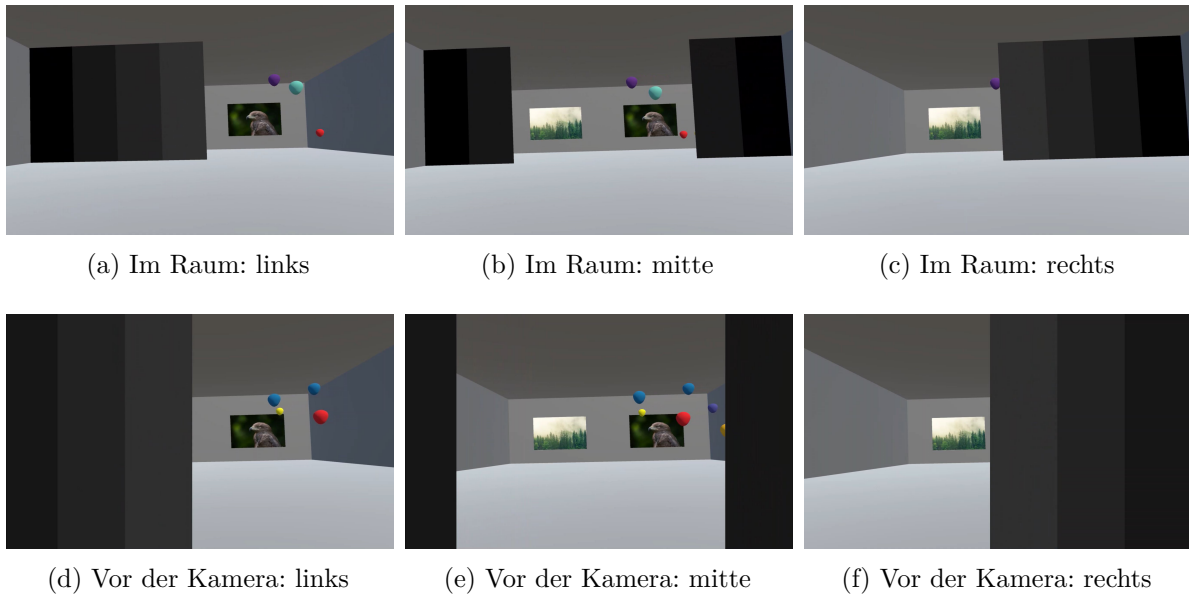


Abbildung 5.8: Basierend auf der Idee von Yasuda et al. [37] wurde ein bewegter Vorhang entwickelt, um die Aufmerksamkeit des Patienten von rechts nach links zu lenken. Illustriert wird die Bewegung im Raum a-c und vor dem Sichtfeld d-f (Kamera) des Nutzers. Mit der etappenweisen Vorhangbewegung nach rechts (Verdeckung linke Seite) und der anschließenden gleichzeitigen Bewegung nach links, wanderte ein sichtbarer Bereich von rechts nach links.

Für die Implementierung wurde ein Ablauf entwickelt, der jedem Parameter zufällig einen Wert aus einem definierten Wertebereich oder einer Menge zuordnete. Die zufällige Zuordnung sollte für Abwechslung sorgen, wobei der Einfluss auf die Wiederholbarkeit (Vergleichbarkeit zwischen den Patienten) als vernachlässigbar betrachtet wurde. Zu den Parametern gehörte die Frequenz der Objekteinblendung (Instanziierung der Objektklone), die Objektgröße, die Farbzugeweisung (zwölf Farbwerte), die Startposition (Höhe und Tiefe) und die Geschwindigkeit (kontinuierlich). Sobald sich das Objekt von der Startposition zur linken Wand bewegt hatte und den Kollider berührte, wurde es ausgeblendet (Abb. 5.8).

Zum Verdecken der OKS-Objekte gab es den Ansatz, den Vorhang im Raum oder vor das Sichtfeld (Kamera) des Patienten zu positionieren. Um die Aufmerksamkeit auf eine Raumseite zu lenken, war es die Idee, eine Seite des Vorhanges bis zur Hälfte des Raumes

reichen zu lassen. Hierfür setzte sich der Vorhang aus vier gleichgroßen und rechteckigen Bildern (Balkenbreite a 3m) mit unterschiedlichem Farbton zusammen. Zum Bewegen des Vorhanges wurde eine Animation als Dauerschleife erstellt. Zum Start bewegte sich der linke Vorhang etappenweise nach rechts (Abb. 5.8 a), bevor er sich anschließend mit dem rechten Vorhang zurück nach links bewegte (Abb. 5.8 b und c). Mit der Bewegung des rechten Vorhangs zurück nach rechts wurde der Blick auf dem Raum wieder freigegeben, bevor sich die Animation wiederholte. Abb. 5.8 d-f stellt das gleiche Prinzip zum Verdecken des Sichtfeldes dar.

Weil die OKS-Objekte nicht statisch waren und sich eigenständig bewegten, war es schwierig, die OKS-Objekte zu verfolgen. Die Bewegung der Vorhänge nach rechts störte zudem den Bewegungsfluss der OKS-Objekte nach links, sodass der Ansatz als unschlüssig betrachtet wurde. Während das OKS-Objekt auffällig gestaltet war, wurden für eine Variation zwischen den Pausenszenen weitere OKS-Objekte benötigt. Des Weiteren sollte die Frequenz der Objekteinblendung und die Geschwindigkeit weiter erhöht werden, sodass große optische "Lücken" zwischen den Objekten geschlossen werden. Bei einer höheren Objekttaktung führte die Variation der Geschwindigkeit und Objektgröße dazu, dass die Flugrichtung einzelner OKS-Objekte bei der Kollision mit schnelleren Objekten abgelenkt (vertikal und horizontal) wurde, sodass die Objektbewegung nicht mehr gradlinig war. Infolgedessen musste ein zu starkes Abweichen verhindert werden. Weiterhin wurde das Auftauchen der Luftballons mit dem Durchfliegen der rechten Wand und das plötzliche Verschwinden vor der linken Wand als unrealistisch betrachtet, sodass ein anderer Ansatz benötigt wurde. Hierfür war es die Idee das Ein- und Ausblenden der OKS-Objekte durch Umgebungsobjekte zu verdecken und eine offene Umgebung bereitzustellen. Fortführend sollten die Teillösungen zur OKS übernommen werden.

Pausenszene (Konvexe Flugbahn)

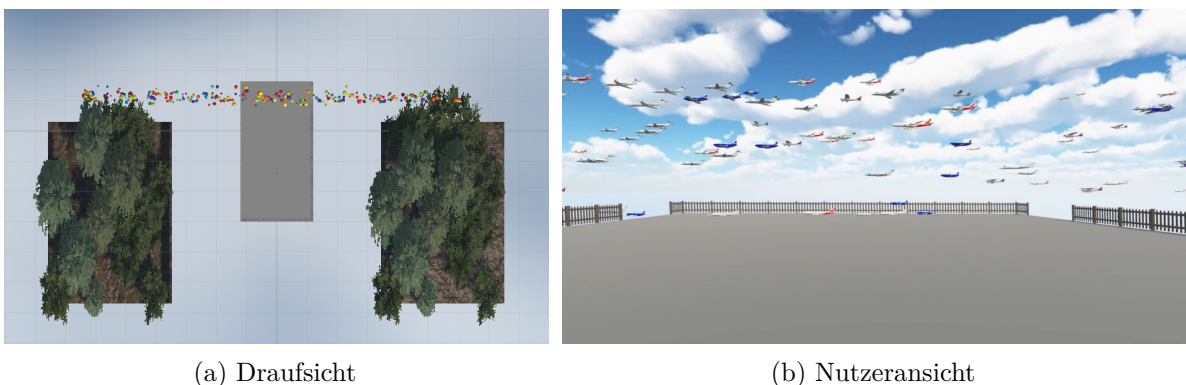
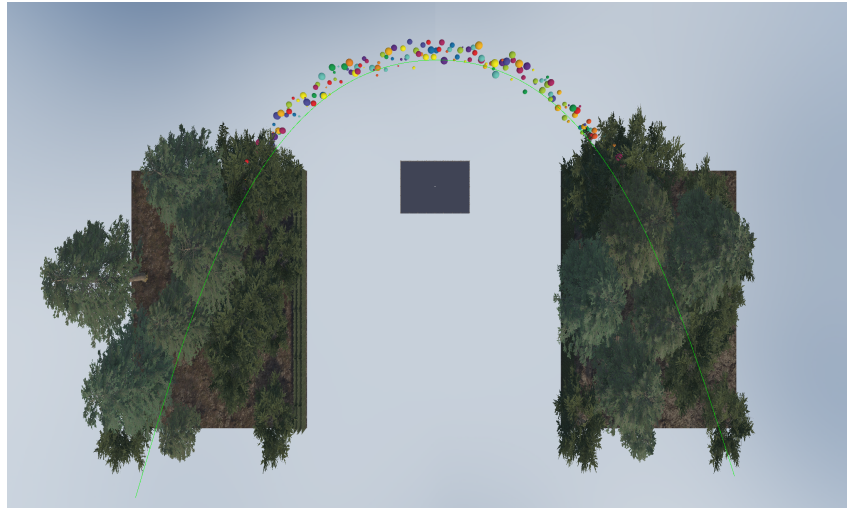


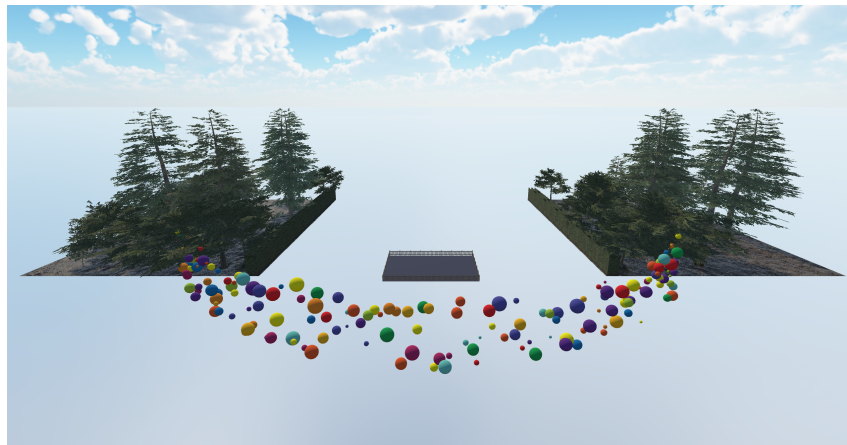
Abbildung 5.9: Darstellung des 3. Entwicklungsansatzes zur OKS mit fliegenden Luftballons aus der Draufsicht (a) und Flugzeuggeometrien aus der Nutzerperspektive.

In der neuen VU befand sich der Nutzer auf einer Plattform mit Blick auf einen freien Himmel mit Wolken. Das Umzäunen der Plattform hatte das Ziel, dem Patienten ein Sicherheitsgefühl zu vermitteln, wobei eine beidseitige Lücke das Durchqueren der OKS-Objekte ermöglichen sollte. Um das Ein- und Ausblenden der OKS-Objekte zu verdecken, wurden zu beiden Seiten der Plattform Hecken und Bäume positioniert. Durch den Einsatz von Kollidern wurde die Geschwindigkeit (Vektor) eines OKS-Objektes bei einer Kollision neu ausgerichtet, sodass das Abweichen von einem begrenzten geradlinigen Korridor verhindert wurde. Zur Auswahl der OKS-Objekte wurden insgesamt vier weitere Ideen im Entwicklungsprozess vorgestellt.

Im Rahmen der Bewertung wurden drei neue OKS-Objekte als geeignet betrachtet, wohingegen die Flugzeuggeometrien ausgeschlossen wurden. Weil die Plattform überdimensional wirkte, sollte sie in Anlehnung an eine Terrasse oder einen Balkon verkleinert werden. Durch die Anpassung sollte zudem der Himmel mehr in den Vordergrund rücken, sodass die OKS-Objekte über diesen hinwegflogen. Eine weitere Anforderung sah es vor, die OKS-Objekte in einer konvexen Flugbahn um die Position des Nutzers zu bewegen. Die Entscheidung basierte darauf, die Tiefe des Raumes mehr ausnutzen zu wollen. Weil für die Pausenszene lediglich eine Zeitdauer von einer Minute vorgesehen war, sollten sich die OKS-Objekte bereits zu Start der Szene in der VU befinden. Hierdurch sollte keine Zeit für die OKS durch das Warten auf vorbeifliegende Objekte verloren gehen. Die Zeitdauer der Pausenszene betrug eine Minute, sodass die im Konzept definierte Gesamtzeit von 30 Minuten in VR nicht zu überschritten wurde. Zum Ende des Entwicklungsprozesses sollten Sounds implementiert und die transparenten Farben eines OKS-Objektes angepasst werden, um einen besserer Kontrast zum Hintergrund zu erreichen.



(a) Draufsicht



(b) Außenansicht

Abbildung 5.10: Gezeigt wird die konvexe Flugbahn der OKS-Objekte in der Pausenszene. Die Objektbewegung wird in der Draufsicht (a) und in der Außenansicht (b) auf die Szene dargestellt.

Mit der Anforderung einer konvexen Flugbahn wurde der bisherige Ansatz zur Objektbewegung angepasst. Um die OKS-Objekte entlang einer konvexen Strecke zu bewegen, wurde sich dazu entschieden, das ebenfalls in der Trainingsszene verwendete Asset (Abs. 5.4.2) zu verwenden. Um eine geeignete Flugbahn zu finden, wurden verschiedene konvexe Kurvenverläufe (Bézierkurven zweiten Grades) in VR miteinander verglichen und die Position der Plattform variiert. Abb. 5.10 a stellt den konvexen Kurvenverlauf als grüne Linie dar. Für die Auswahl war es entscheidend, dass die Distanz zu den OKS-Objekten nicht zu groß war und der gekrümmte Flugverlauf in VR wahrgenommen wurde. Neben dem Detailgrad hatte der begrenzte Abstand das Ziel, eine ausreichende Objektdifferenzierung des ET zu gewährleisten. Durch das Erweitern des Assets ließen sich die Objekte zudem an einem geeigneten Start- und Endpunkt des Kurvenverlaufes ein- und ausblenden. Um die Auswertung zu erleichtern, wurde die zurückgelegte prozentuale Strecke der Objekte

für die Dokumentation auf einen Wert von 0-1 (0-100%) normalisiert. Mit dem neuen Ansatz wurden die OKS-Objekte gleichmäßig mit einer Geschwindigkeit von 1,6 m/s (5,76 km/h) bewegt. Außerdem wurde eine Kollision der Objekte miteinander ausgeschlossen, was die Verwendung von Kollidern obsolet machte. Ein hiermit einhergehender Nachteil war es, dass vereinzelte Objekte ineinander eindringen konnten. Dieser Effekt galt jedoch aufgrund seines seltenen Auftretens als vernachlässigbar.



Abbildung 5.11: Ansicht des Nutzers in der Pausenszene bei der Beobachtung von Luftballons auf einer konvexen Flugbahn. Zu sehen ist, wie die OKS-Objekte hinter einer Hecke und Bäumen verschwinden, bevor sie ausgeblendet werden.

Um eine immersive und entspannende VU zu erzeugen, wurden drei Sounds (Naturgeräusche und entspannende Musik) ausgewählt, die mit den OKS-Objekten zwischen den Pausenszenen iteriert wurden. Um eine Wiederholbarkeit zu gewährleisten, wurden die Sounds und die OKS-Objekte in einer festen Reihenfolge zwischen den Szenenwechseln variiert. Abb. 5.11 stellt die finale Pausenszene mit einer konvexen Flugbahn dar.

5.4 Trainingssystem

5.4.1 Trainingskonzept

Im Folgenden wird die Entwicklung des Trainingskonzeptes erläutert. Für die Gestaltung der Trainingslevel wurden im Entwicklungsprozess Schwierigkeitsparameter ausgewählt. Die Umsetzung der ausgewählten Parameter *Objektgröße* und *Kameraabstand (Fließbandlänge)* erforderte es, geeignete Skalierungs- und Distanzwerte zu finden. Im Entwicklungsprozess wurde sich über mehrere Iterationen und prototypische Programmversionen den optimalen Parametern angenähert.

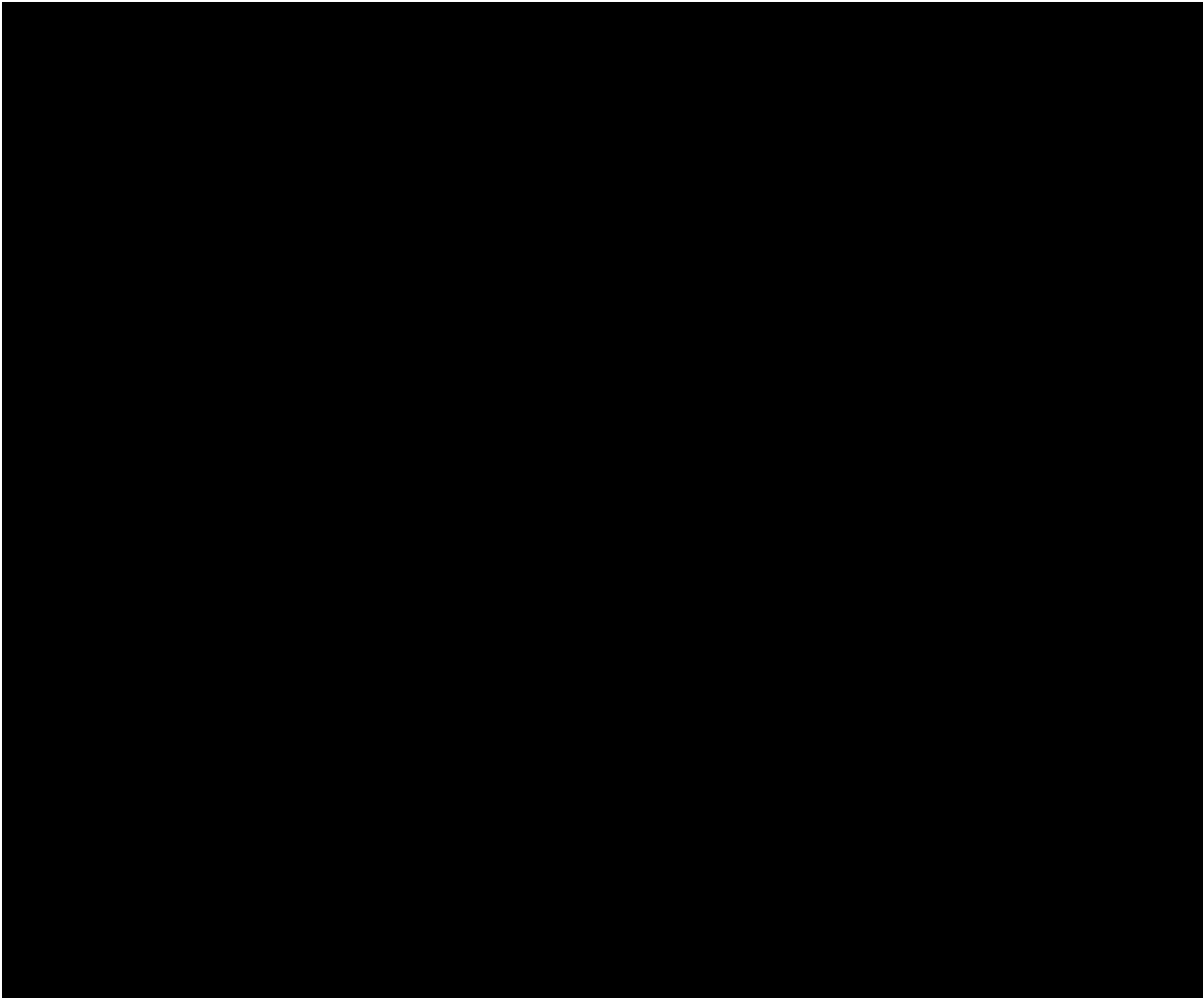


Abbildung 5.12: Das Bild stellt exemplarisch die HMD-Ansichten als Kombination der Parameter Kameraabstand (Entfernung) und Objektgröße (Scale) als Übersicht dar. Für die Visualisierung wurden sieben Fließbandobjekte auf einem geradlinigen Fließband positioniert.

Die Aufgabe bestand darin, das horizontale Sichtfeld weitestgehend durch den Transport der Objekte einzuschließen. Damit der Transport perspektivisch problemlos verfolgt werden konnte, durfte die Entfernung zwischen Nutzerposition und Fließband nicht zu groß oder zu klein sein. Außerdem benötigten die Fließbandobjekte eine ausreichende Objektgröße. In einem ersten Schritt wurde dem klinischen Partner in einer grafischen Übersicht die Kombination der Parameter Kameraabstand und Objektgröße (Skalierung) für sieben Fließbandobjekte auf einem geradlinigen Fließband zur Verfügung gestellt. Weil das tatsächliche FoV im HMD deutlich schmäler war als auf dem Monitor dargestellt, wurden die Bilder perspektivisch verkleinert. Abb. 5.12 gibt stellt die Nutzeransichten dar.

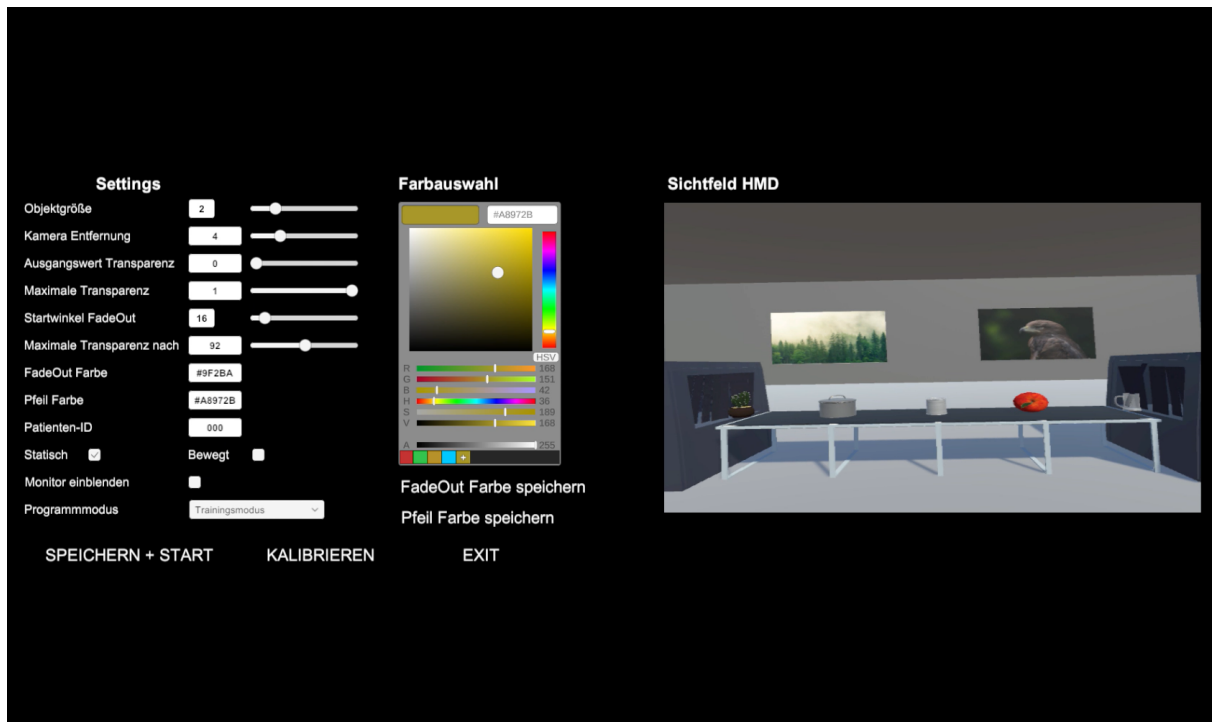


Abbildung 5.13: Die Anwenderoberfläche des Prototyps der Version 1.6 stellt exemplarisch eine Kameraentfernung von 4m und eine Objektgröße von 2 dar.

Um den Zusammenhang der Parameter in VR begutachten zu können, wurden prototypische Programmversionen mit einem Menü erstellt, die es dem Nutzer ermöglichten, die Szene zu modifizieren. Während es in einer früheren Version des Prototyps erforderlich war, die Parameterwerte eigenständig einzutragen, wurde sich fortführend dafür entschieden, den Eingabebereich durch die Implementierung von Schieberegler zu begrenzen. Des Weiteren wurde auf der Anwenderoberfläche die Kameraansicht des Nutzers als Textur dargestellt, sodass der Therapeut im Menü zu jedem Zeitpunkt die Ansicht des Patienten im HMD sehen konnte (Abb. 5.13 Sichtfeld HMD). Für die Darstellung wurde das horizontale FoV angepasst, sodass diese mit der Ansicht des HMD übereinstimmte. In den prototypischen Versionen ließen sich somit zudem etwaige Parameteränderung als direkte Vorschau betrachten. Weil die Objekte eine unterschiedliche Größe besaßen (Abb. 5.12), wurden die Objekte auf eine optisch ähnliche Größe skaliert. Dies sollte eine vergleichbare Objekterkennung und ET-Selektion sicherstellen.

Der Prototyp 1.6 ermöglichte es, den bisherigen Entwicklungsstand der Features zu testen. Mit der Modifikation des Kameraabstandes wurde automatisch die Fließbandlänge angepasst, sodass lediglich eine dazugehörige Objektgröße gefunden werden musste. Um die Parameter besser einschätzen zu können, konnten die Objekte nacheinander bei einem Transport begutachtet werden. In der Bewertung wurde für die Tutorials ein Kameraabstand von 5m und eine Objektgröße von vier (Skalierungsfaktor) ausgewählt.

Für die Trainingslevels wurde ein einheitlicher Abstand von neun m und eine Objektgröße von sechs ausgewählt.

In einem nächsten Schritt sollten die weiteren Schwierigkeitsparameter durch vereinfachte exemplarische Trainingslevels demonstriert werden. Zu diesem Zweck wurden prototypische Abläufe entwickelt. Nachdem geeignete Werte für den Kameraabstand und die Objektgröße gefunden wurden, ließen sich die 45 Fließbandobjekte vorverarbeiten und auf die benötigten Größen skalieren. Durch die Auswahl der Objektgröße sechs bestand die Notwendigkeit die Ein- und Ausgänge des Fließbandes zu vergrößern, sodass die Objekte den Durchgang passieren konnten. Um eine hohe Immersion zu erzeugen, wurde der Vorhang des Ein- bzw. Ausganges mit Blender in neun Geometrien zerschnitten. Durch das jeweilige Zuordnen eines Kolliders und der Verwendung eines Unity Features (Joints) konnten ein Drehpunkt und Bewegungsrestriktionen definiert werden. Bei einer Berührung mit einem Fließbandobjekt rotierten die Vorhangabschnitte um ihren Rotationspunkt. Für einen Suchmodus bestand die Idee, das Zielobjekt innerhalb einer Trainingsiteration (a fünf min) zu wechseln, sodass der Patient in der Trainingsszene nach verschiedenen Objekten suchen musste. Für die Umsetzung wurden von den 45 Fließbandobjekten Bilder erstellt, sodass das Bild des neuen Zielobjektes zum Wechsel des Zielobjektes dargestellt werden konnte.

Mit dem Prototyp 1.7 wurden die exemplarischen Trainingslevels zur Integration der Schwierigkeitsparameter vorgestellt. Die Visualisierung hatte das Ziel, einen besseren Eindruck von den Gestaltungsmöglichkeiten zu erhalten. Zu Visualisierungszwecken wurde mit Schiebereglern die *Geschwindigkeit* (schnell und langsam) reguliert. Für den *Transport mehrerer Objekte* konnte für ein Fließband die Anzahl falscher Objekte und die Taktung als Startfrequenz ausgewählt werden. Neben der Variation der *Fließbandhöhe (Horizontal)* wurde der *Transport mehrerer Objekte* als Suchmodus auf zwei Fließbändern illustriert, wobei das Zielobjekt auf einem Display zu sehen war. In einen gemeinsamen Diskurs wurde die Gestaltung der finalen Trainingslevel beschlossen.

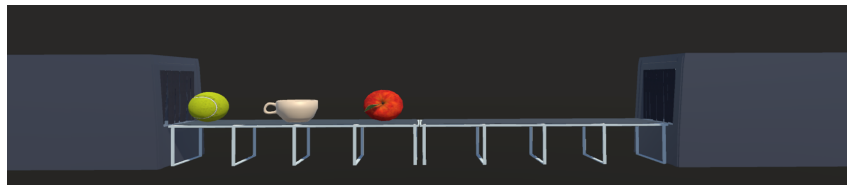
5.4.2 Trainingslevel

Nachfolgend werden die finalen Trainingslevel dargestellt. Im Anschluss werden notwendige Änderungen nach dem gemeinsamen Diskurs zum Erreichen der finalen Version wiedergegeben.

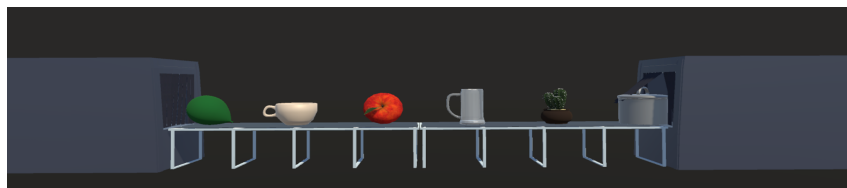


Abbildung 5.14: Trainingslevel eins aus der Ansicht des Nutzers.

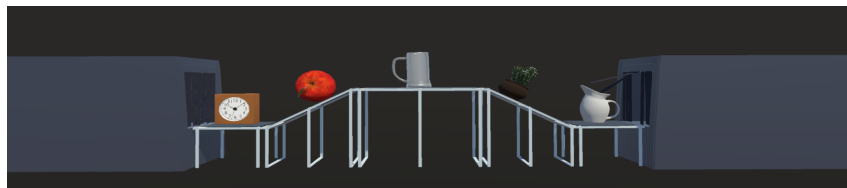
In allen Trainingslevels durfte zu jedem Zeitpunkt nur ein Zielobjekt transportiert werden. Bei der Verwendung mehrerer Fließbänder durfte sich das Zielobjekt somit auf lediglich einem Fließband befinden. Damit der Patient das Zielobjekt identifizieren konnte, wurde es auf einem weißen Poster an der Wand hinter dem Fließband angezeigt. Abb. 5.14 stellt die finale Version des Trainingslevel eins dar. In Trainingslevel eins bis vier handelte es sich bei dem Zielobjekt immer um das gleiche markante Objekt. Für Abwechslung wurde das Zielobjekt je Training (a fünf min) bzw. Iteration (T-P) variiert, sodass es je Trainingslevel drei Zielobjekte gab. Zur Vermeidung der Verwechslungsgefahr durften die drei Zielobjekte im jeweiligen Trainingslevel nicht als falsches Objekt verwendet werden.



(a) Trainingslevel eins



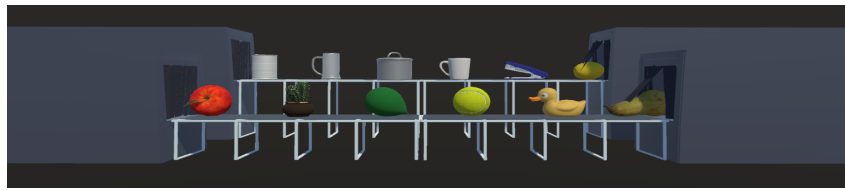
(b) Trainingslevel zwei



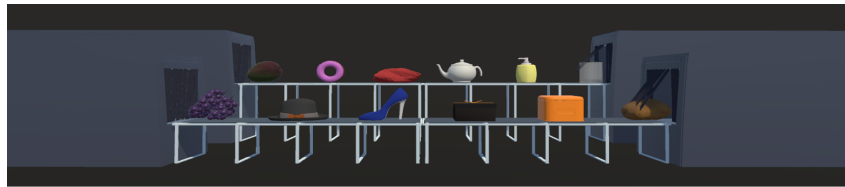
(c) Trainingslevel drei

Abbildung 5.15: Darstellung der finalen Gestaltung der Trainingslevel eins bis drei.

Um die Differenzierung des Zielobjektes zu erschweren, stieg die Anzahl der falschen Objekte mit den Trainingslevels an. Zu Beginn des Trainings wurde in Trainingslevel eins mit zwei falschen Objekten eine einfache Differenzierung zum nächsten Objektdurchlauf bzw. Zielobjekt bereitstellt. In Trainingslevel zwei wurden bereits fünf falsche Objekte je Objektdurchlauf (Zielobjekt und falsche Objekte) transportiert. Während sich auf dem gesamten Fließband Objekte befanden, war weiterhin ein optischer Abstand als "Lücke" zum nächsten Objektdurchlauf erkennbar. Ab Trainingslevel drei war zwischen den Objektdurchläufen kein größerer Abstand mehr erkennbar, wodurch für den Patienten die Schwierigkeit der Objektidentifikation erhöht werden sollte. Des Weiteren wurde der Fließbandtransport dieses Levels in der horizontalen Höhe variiert.



(a) Trainingslevel 4



(b) Trainingslevel 5



(c) Trainingslevel 6

Abbildung 5.16: Darstellung der finalen Gestaltung der Trainingslevel vier bis sechs.

Ab Trainingslevel vier wurde ein zweites Fließband für den gleichzeitigen Transport von Objekten auf unterschiedlichen Höhen eingeführt. In Trainingslevel fünf wurde der Suchmodus zur Variation des Zielobjektes zwischen den Objektdurchläufen umgesetzt. In Trainingslevel sechs wurde der Suchmodus durch ein drittes Fließband ergänzt. Mit der Einführung von weiteren Fließbändern durfte sich das Zielobjekt weiterhin lediglich auf einem Fließband befinden. Um eine Wiederholbarkeit zu gewährleisten waren die Zielobjekte und die Fließbandreihenfolge zum Transport dieser zwischen den Patienten identisch. Tab. 5.1 gibt einen Überblick über die Merkmale der Trainingslevel.

Tabelle 5.1: Listet die Merkmale der finalen Trainingslevels auf.

Trainingslevel	Merkmale
1	<ul style="list-style-type: none"> • drei Zielobjekte • zwei falsche Objekte • großer optischer Abstand bzw. Lücke zum nächsten Zielobjekt
2	<ul style="list-style-type: none"> • drei Zielobjekte • fünf falsche Objekte • sichtbare optische Lücke zum nächsten Zielobjekt
3	<ul style="list-style-type: none"> • drei Zielobjekte • Variation der Fließbandhöhe • keine optische Lücke zum nächsten Zielobjekt
4	<ul style="list-style-type: none"> • drei Zielobjekte • keine optische Lücke zum nächsten Zielobjekt
5	<ul style="list-style-type: none"> • Variation des Zielobjektes (Suchmodus) • 2 Fließbandbänder zum Transport der Objekte • keine optische Lücke zum nächsten Zielobjekt
6	<ul style="list-style-type: none"> • Variation des Zielobjektes (Suchmodus) • 3 Fließbandbänder zum Transport der Objekte • keine optische Lücke zum nächsten Zielobjekt

Expertenfeedback

Die Rückmeldung der fünf Experten ergab z. T. wichtige Hinweise die zur Verbesserung und finalen Gestaltung der Trainingslevel beitrugen. Folgend werden die Veränderungen hin zu den bereits visualisierten Trainingslevels beschrieben.

- **Studentin/Praktikantin, weiblich (23):** In den Szenen 2 und 3, in denen mehrere Fließbänder mit Gegenständen waren, hat der Eyetracker manchmal nicht funktioniert. Das war vor allem der Fall, wenn in der Reihe unter dem zu fixierenden Objekt ein Gegenstand war, der größer war oder etwas nach oben ragte. Obwohl ich das richtige Objekt anschaute, dachte das System, ich würde fälschlicherweise den unteren Gegenstand anschauen (D3 Tab. 6.2).
- **Orthoptistin, weiblich (44):** Etwas zu enger Abstand zwischen Objekten (A3 Tab. 6.2).

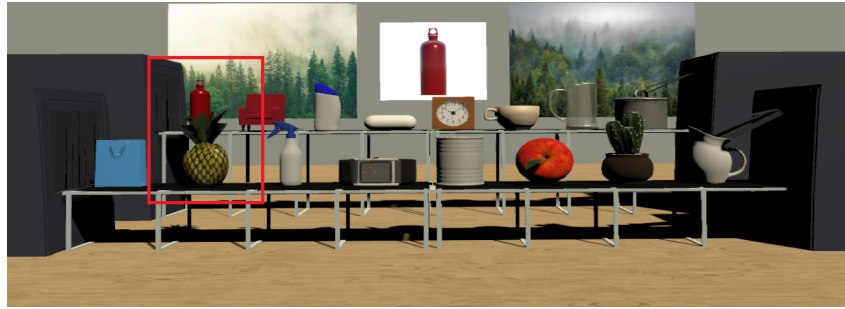


Abbildung 5.17: Darstellung der Problematik zur ET-Selektionsmethode. Die Genauigkeit der Selektion nahm für dicht beieinanderstehende oder sich verdeckende (rot) Objekte ab.

Eigene Testungen bestätigten die beschriebene Problematik. Je dichter die Objekte beieinander standen, desto ungenauer differenzierte die ET-Selektionsmethode das Fokussieren eines Objektes. Für ein robusteres ET wurde die Anzahl falscher Objekte für die Trainingslevel zwei bis sechs reduziert. Hierbei wurde die Taktung der Objekte entsprechend angepasst. Die Problematik bestand weiterhin bei einer ungünstigen Kombination von Objekten auf mehreren Fließbändern. Stand ein besonders hohes Objekt auf einem Fließband, war die Distanz zu dem darüberliegenden Fließbandobjekt sehr gering, sodass das Objekt sogar vereinzelt verdeckt wurde. Abb. 5.17 stellt die Problematik an dem Objekt Ananas dar. In einem ersten Lösungsansatz wurde die Fließbandgeometrie des oberen Fließbandes erhöht. Der Ansatz wurde verworfen, da das Ergebnis in VR als visuelle Verschlechterung wahrgenommen wurde und sich die Distanz lediglich zum oberen Fließband vergrößert hätte. Eine Lösung wurde erreicht, indem lediglich die Höhe der Objekte verkleinert wurde, ohne dass diese verzerrt wirkten. Aufgrund einer zu großen Höhe und aus Performancegründen wurden zwei Objekte ausgeschlossen, sodass die Gesamtanzahl nur noch 43 Objekte umfasste.

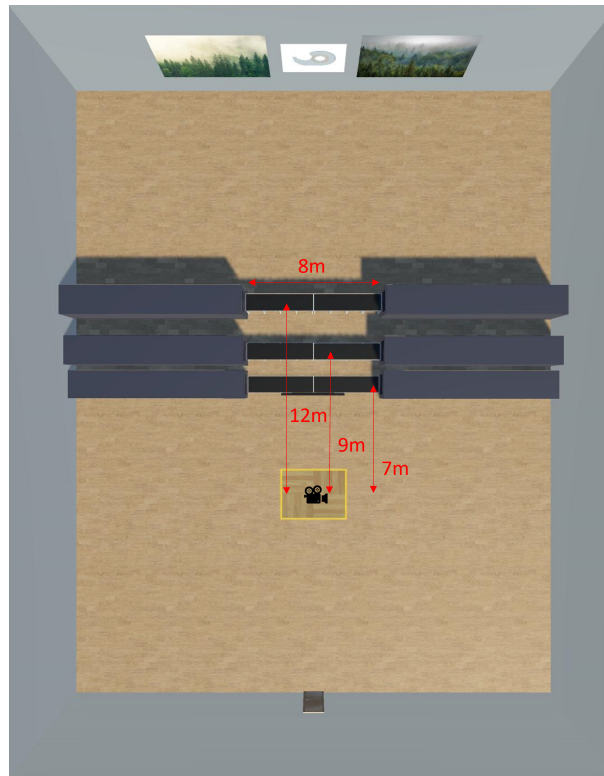


Abbildung 5.18: Gezeigt wird der finale Aufbau des Trainingslevels sechs in der Draufsicht. Die Bemaßung stellt den Abstand von der Nutzerposition zur Fließbandmitte der drei Fließbänder dar.

Ein Softwaretest im UKL ergab, dass die Testperson in Trainingslevel sechs die äußersten Objekte auf dem unteren Fließband im eigenen Sichtfeld nicht sehen konnte. Während die Objekte bei eigenen Tests fokussiert werden konnten, ohne das, dass Kopfhaltfeedback aktiv wurde, wurde versucht, eine Lösung zu finden. Indem das vorderste Fließband weiter nach hinten platziert wurde, ließen sich die äußersten Objekte deutlich besser sehen, sodass eine v. a. patientengerechte Lösung gefunden werden konnte. Abb. 5.18 stellt den finalen Aufbau des Trainingslevels sechs in der Draufsicht mit den Abständen zu den Fließbändern dar.

- **Psychologisch technische Assistentin, weiblich (47):** Vielleicht ein paar Geräusche einbauen, z.B. wenn sich eine Klappe öffnet, um das ganze noch realistischer zu gestalten. Bzw. könnte das auch nebenbei das Startsignal sein um die Aufmerksamkeit des Patienten zu bekommen (B10 Tab. 6.5).

Während Störgeräusche durch Maschinen als Schwierigkeitsparameter ausgeschlossen wurden, ist durch den Hinweis die Idee gestanden, einen monotonen Maschinensound als Hintergrundgeräusch zu implementieren. Nach der Recherche und Implementierung eines Sound-Abschnittes wurde eine Soundsteuerung entwickelt, damit der Sound der Maschine

lediglich zur Objektbewegung abgespielt wurde. Das neue Feature konnte die subjektive Immersion gesteigert werden.

Beförderungsprinzip



Abbildung 5.19: Schematische Visualisierung des Beförderungsprinzips.

Für die Umsetzung des Beförderungsprinzips wurde in einem ersten Schritt ein Asset zur Objektbewegung entlang eines Weges modifiziert und erweitert, sodass ein geeigneter Ablauf entstand. Nach der Bestätigung zum Start des Trainingslevels wurde das Zielobjekt in dem Eingang des Fließbandes (Startposition) eingeblendet (instanziiert) und mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit von ein m/s bewegt. Darauf folgende falsche Objekte wurden nach einer definierten Taktung an der Startposition eingeblendet und mit der gleichen Geschwindigkeit transportiert. Sobald das Zielobjekt eine gewisse prozentuale Strecke zurückgelegt hatte, wurden die Fließbandobjekte gestoppt. Indem der Patient das Zielobjekt in Summe für drei s fokussierte wurden die Objekte abtransportiert und im Ausgang des Fließbandes ausgeblendet. In einer zeitlichen Differenz zur Nutzerbestätigung wiederholte sich der iterative Vorgang bis zum Ablauf der Trainingszeit. Über den Entwicklungsprozess wurde der Ablauf für die Implementierung der Trainingslevels und weiterer Anforderungen stetig weiterentwickelt und verbessert.

5.4.3 Tutorials

Um das Training patientengerecht zu erklären wurde eine Monitor-Geometrie verwendet. Hierbei war es wichtig dem Patienten die Abläufe simpel, unterhaltsam und verständlich zu erklären. In einem ersten Schritt wurden in Rücksprache mit der klinischen Expertin Anleitungstexte erstellt, die im Entwicklungsprozess iterativ angepasst wurden. Hierbei war es eine grundlegende Voraussetzung die Patienten zu siezen und nach dem Erfüllen einer Aufgabe zur Motivation zu loben. Um sicherzustellen, dass der Patient die Informationen vermittelt bekommt sollten die Instruktionen vorgelesen werden. Um dafür Sorge zu tragen, dass der Patient die Instruktionen zudem möglichst versteht sollte ein angezeigter Displaytext eigenständig durch den Nutzer bestätigt werden, sodass der Nutzer

die Möglichkeit bekam bei Bedarf einen Text eigenständig nachzulesen. Zusätzlich wurden die beschriebenen Inhalte als Videos dargestellt. Für das Vorlesen der Texte wurde eine geeignete Stimme (Google Text-to-Speech) zum erstellen von KI-generierten Audiodateien ausgewählt. Weil der Detailgrad des Monitors in VU von einer gewissen Entfernung im HMD begrenzt war, durfte die Textgröße nicht zu klein sein, sodass die Instruktionen in einzelne Schritte aufgeteilt wurden. Für die Anzeige von Texten und Bildern sowie dem Abspielen der Sprachdateien und Videos wurde ein Ablauf implementiert.

Displaysteuerung. Damit der Nutzer den Trainingsstart in einem Trainingslevel oder einen Programmschritt im Tutorial bestätigen konnte, wurde eine Displaysteuerung entwickelt. Zur Bestätigung hatte der Patient die Aufgabe, einen kreisrunden ET-Button für drei Sekunden zu fokussieren, wobei der Ladekreis die Zeitdauer visualisierte. Wich der Patient mit dem Blick zwischenzeitlich ab, wurde die Zeit zurückgesetzt und der Button musste erneut lokalisiert und angeschaut werden. Um einen gewissen Schwierigkeitsgrad zu erzeugen, wurde der ET-Displaybutton auf den Monitoren in der unteren linken Ecke angezeigt. Nachdem auf dem Display ein Text angezeigt und vollständig vorgelesen wurde, wurde der Displaybutton eingeblendet. Hierdurch sollte verhindert werden, dass der Patient auf den Button schaut, obwohl die Funktionalität nicht aktiv war bzw. benötigt wurde. Nach einer bestimmten Zeitdauer wurde das 2. Hilfstools aktiviert, welches dem Patienten half, den Button zu lokalisieren.

Storytelling. Um den Patienten das Interaktionskonzept, den Trainingsablauf und Hilfestellung zu erklären, wurden die Instruktionen in eine kurze Geschichte eingebunden. Die Idee bestand darin, dem Patienten mitzuteilen, dass er die Aufgabe hat, die Schicht des Wachpersonals zu übernehmen. Als Wachpersonal sollte der Transport der Gegenstände im Auftrag einer Umzugsfirma überwacht werden, um sicherzustellen, dass keine Objekte vom Band fallen. In dem darauffolgenden Tutorial wurde dem Patienten durch seine gute Arbeit vom Chef Michael die gleichzeitige Überwachung eines zweiten Fließbandes anvertraut. Weil Michael einen Mitarbeiter beim Klauen der Gegenstände vom Band erwischt hatte, bekam der Patient im Tutorial 3 schlussendlich das dritte Fließband zum überwachen zugewiesen.

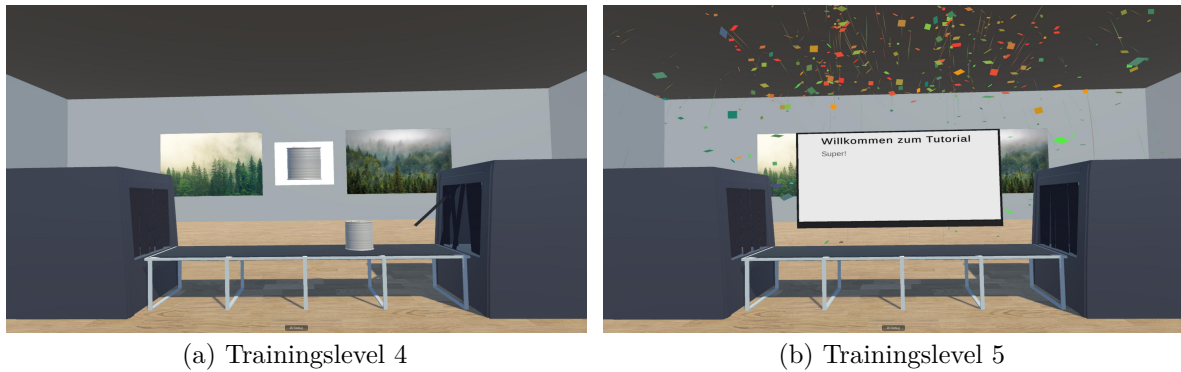


Abbildung 5.20: Darstellung einer interaktiven Aufgabe und eines Belohnungseffektes im Tutorial 1. Nachdem der Nutzer nacheinander drei Objekte verfolgt und bestätigt hatte, wurden Belohnungseffekte abgespielt.

Um die Geschichte authentischer wirken zu lassen, wurde sich in einer weiteren Iteration dazu entschieden, die Charaktere durch geeignete Illustrationen (Bilder) auf dem Monitor darzustellen. Nachdem dem Patienten die Instruktionen in Form von Text, Sprache und Video vermittelt wurden, hatte er die Aufgabe, die Interaktion eigenständig durchzuführen, sodass die Trainingsabläufe und Interaktion schrittweise erlernt wurden (Abb. 5.20 a). Um den Patienten für eine absolvierte Aufgabe im Tutorial oder ein abgeschlossenes Trainingslevel zu belohnen, wurden drei visuelle Effekte als optisches Konfetti (Abb. 5.20 b) entwickelt. Durch zwischenzeitliche Veränderungen bestand zu dem die Notwendigkeit, zusätzliche Instruktionen zu erstellen, anzupassen oder die Reihenfolge zu ändern. Weiterhin wurde sich darauf verständigt, dass jeder Text durch den Patienten m. H. des Displaybuttons bestätigt werden sollte.

Expertenfeedback

- **Orthoptistin, weiblich (44):** Etwas zu lange Instruktion. Zur Bestätigung der Instruktion darf der Blick auf Kreis nicht gezwinkert werden (A3 Tab. 6.2).
- **Studentin/Praktikantin, weiblich (23):** Die Auffälligkeiten des blinkenden Buttons und des Pfeils sind meiner Meinung nach effektive Maßnahmen, um bei Patienten mit Neglect die Aufmerksamkeit zu lenken. Hier ist mir aufgefallen, dass die Zeit von vorne begann, wenn sich mein Gesicht leicht bewegte oder mein Auge einen anderen Punkt in dm Kreis fixiert (D3 Tab. 6.2).

Die Rückmeldung der Experten ergab, dass das Tutorial eins zu lange dauerte und zu viel Aufmerksamkeit durch die Bestätigung des ET-Displaybuttons benötigte. Um die Länge zu reduzieren, wurden vereinzelt Anleitungstexte entfernt. Zusätzlich wurde die Zeitdauer für den ET-Displaybutton aufsummiert und auf zwei Sekunden reduziert, sodass bei einem Blinzeln oder Verlust des Blickkontaktes die Zeitdauer nicht zurückgesetzt wurde.

Trainingsperformance

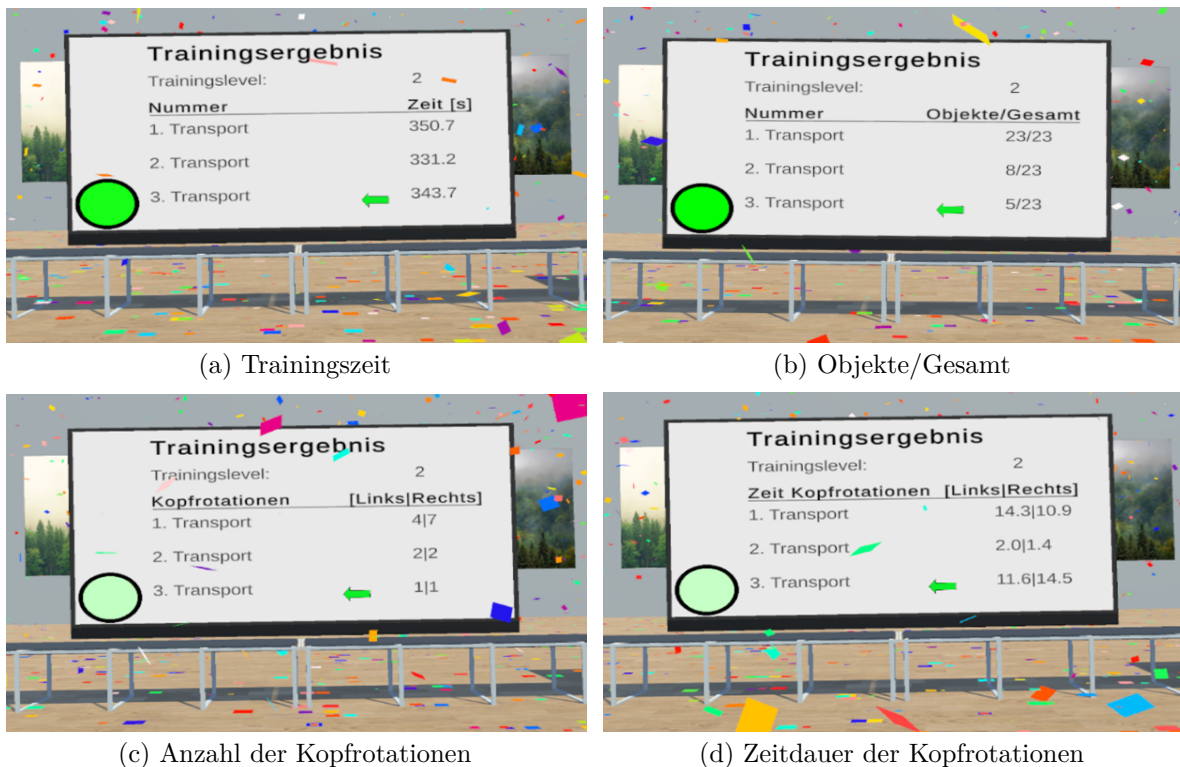


Abbildung 5.21: Exemplarische Darstellung der Trainingsperformance auf einem Monitor. Für jeden Transport eines Trainingslevels ist die Trainingszeit (a) und Anzahl der Zielobjekte (b) sowie die Anzahl (c) und Zeitdauer (d) der Kopfrotation nach links und rechts dargestellt.

Um dem Patienten seine Trainingsperformance zu visualisieren, mussten geeignete Bewertungsparameter identifiziert werden. Die Idee bestand darin, die kognitive Leistung des Patienten daran zu bemessen, wie gut er es schaffte, seinen Kopf gerade zu halten (neutraler Bereich, 5.5.1) bzw. eigenständig zu korrigieren. Des Weiteren reflektierte die Anzahl der beobachteten Zielobjekt die Leistung der Nutzerbestätigung (drei s anschauen). Weil dem Patienten im Storytelling des Tutorials die Aufgabe hatte, den Umzug zu überwachen, wird im Folgenden von drei Transporten bzw. Umzügen je Trainingslevel gesprochen.

Nach dem Absolvieren eines Trainingslevels gelangte der Patient zurück in den Trainingsraum, wo ihm die Ergebnisse der Umzüge anhand verschiedener Bewertungsparameter. Hierbei wurde jeder Parameter auf einem großen Display in tabellarischer Form für die drei Transporte dargestellt. Die Kopfzeile zeigte das absolvierte Trainingslevel als Nummer an. Um das nächste Ergebnis auf dem Display anzuzeigen, erschien nach einer Zeitdauer von 6s der ET-Displaybutton. Im Folgenden werden die sechs Bewertungsparameter dargestellt.

- **1. Zeit [s]:** Die gesamte Zeit an die der Nutzer in dem Trainingsraum verbracht hat, in Sekunden an. Die Zeit beinhaltet die Zeit zur Bestätigung des Displaybuttons zum Start eines Trainingslevels bzw. Fließbandes und die Trainingszeit von mindestens fünf Minuten.
- **2. Objekte/Gesamt:** Gibt die Anzahl der transportierten Zielobjekte je Transport an. In der Trainingszeit von fünf Minuten war die Anzahl der Zielobjekte gedeckelt.
- **3. Kopfrotationen [Links/Rechts]:** Gibt die Anzahl der Abweichungen von der neutralen Kopfposition nach rechts und links an. Weicht der Patient z. B. durch eine Kopfrotation nach links ab, wird eine Abweichung nach links registriert. Erst nachdem der Kopf gegen oder mit dem Uhrzeigersinn zurück in den neutralen Bereich rotiert wird, kann eine erneute Abweichung registriert werden.
- **4. Zeit Kopfrotationen [Links/Rechts]:** Gibt die aufsummierte Zeit alle Kopfabweichungen nach links und rechts in Sekunden an. Für die Zeiterfassung war es irrelevant, ob die Hilfestellung angezeigt wurde, sodass ebenfalls eine Abweichung, von der dem Ladekreis bzw. der neutralen Position registriert wurde.
- **5. Hilfestellungen:** Gab die Anzahl der benötigten Hilfestellungen je Transport an.
- **6. Zeit Hilfestellungen [s]:** Gab die benötigte Zeit aller Hilfestellungen von dem Einblenden bis zur erfolgreichen Bestätigung in Sekunden an.

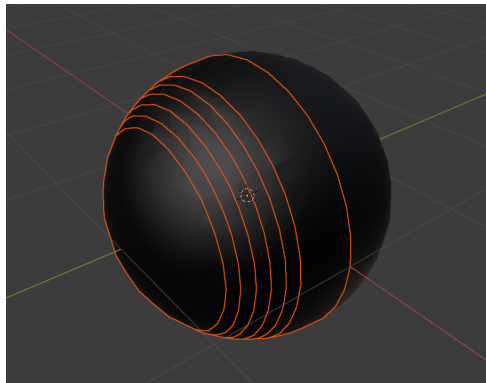
Abb. 5.21 stellt die Visualisierung der Trainingsperformance dar. Benötigte der Patient mehr Zeit, um die Nutzerbestätigung auf dem Fließband durchzuführen, konnten aufgrund der begrenzten Trainingszeit weniger Zielobjekte im Umzug überwacht bzw. transportiert werden. Obwohl sich die Objekte mit der gleichen Geschwindigkeit bewegten, variierte die Gesamtanzahl der Zielobjekte zwischen den Trainingslevels. Weil dem Patienten in Trainingslevel eins und zwei mehr Zeit zur Verfügung gestellt wurde, um seinen Blick zum Wechsel des Zielobjektes auf den Ausgang zu richten, konnten bis zu 23 Zielobjekte überwacht werden. Die Fließbandstrecke in Trainingslevel drei war vergleichsweise kürzer, sodass sich eine Anzahl von 26 Zielobjekten ergab. In Trainingslevel vier bis sechs war die zeitliche Verzögerung vor dem Start des nächsten Zielobjektes geringer, sodass die Anzahl der Zielobjekte 25 betrug.

5.5 Hilfestellungen

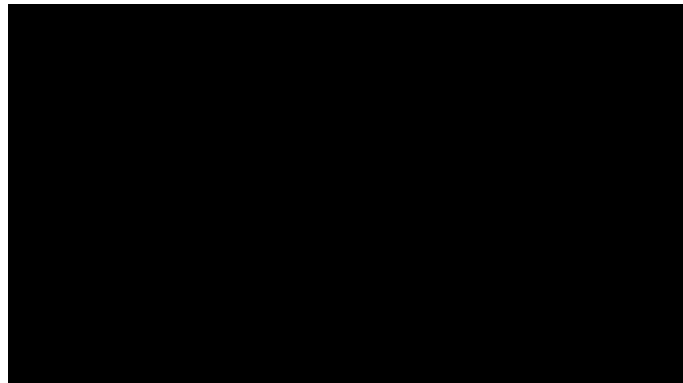
5.5.1 1. Hilfstool (Kopfhaltfeedback)

Um dem Patienten bei Bedarf einen visuellen Hinweis zur Verfügung zu stellen wurden für das Kopfhaltfeedback in einem ersten Schritt drei prototypische Konzepte entwickelt und gegenübergestellt. Die grundlegende Idee war es, das Sichtfeld des Patienten bei einer Kopfdrehung visuell abzdunkeln. Um zu verhindern, dass der Nutzer die Orientierung (Orientierungspunkte) verliert, sollte das Sichtfeld bei einer Kopfdrehung nicht unmittelbar undurchsichtig werden. Stattdessen war es die Idee, das Sichtfeld mit dem Grad der Abweichung von einem transparenten Farbübergang hin zur Intransparenz einzufärben, sodass die Stärke des Hinweises anstieg.

1. Konzept: Geometrische Kugel



(a) Ansicht der Geometrie in Blender

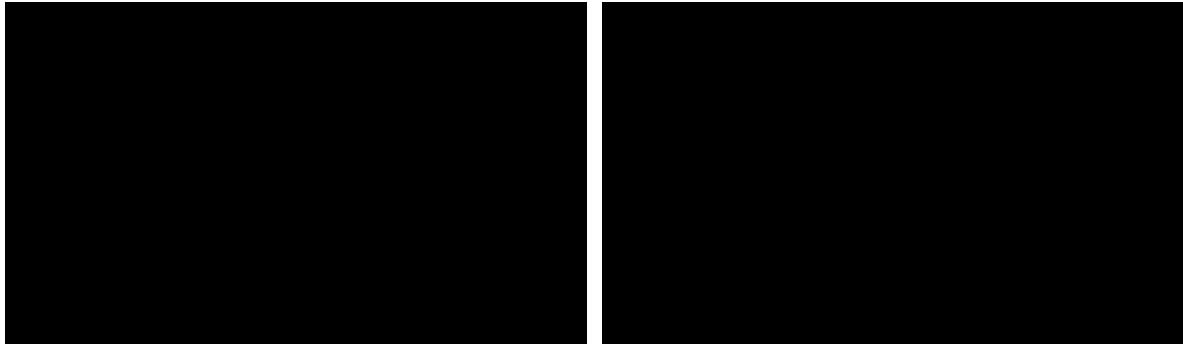


(b) Nutzeransicht des Gucklochs

Abbildung 5.22: Als 1. Konzept des 1. Hilfstools wurde eine geometrische Kugel mit eingefärbten Teiloberflächen als eine Art Guckloch erstellt (a). Bei einer Abweichung des Kopfes von der Neutralstellung sollte der Nutzer ein visuelles Feedback erhalten (b).

Das 1. Konzept hatte die Idee den Nutzer (Kamera) in einer geometrischen Kugel zu Positionen und durch das Einfärben von Teiloberflächen eine Art Guckloch zu erstellen. Drehte der Nutzer den Kopf sollte optisch das Sichtfeld zur Seite der Kopfdrotation hin ausgeblendet werden, sodass dem Patienten signalisiert wurde in welche Richtung er mit dem Kopf abwich. Hierfür wurde eine Kugel (Durchmesser zwei m) erstellt und mit der Software Blender in acht Teile zerschnitten. Zusätzlich wurde die Farbgebung aus der Sicht des Kugelininneren sichtbar gemacht. Mit einem horizontalen FoV von 110° sollte bei einer Abweichung ein Farbübergang von 25° durch fünf Teilflächen (a fünf Grad) in verschiedener Transparenz erzeugt werden.

2. Konzept: verschobenes Bild



(a) Transparenter Übergang

(b) Fortlaufendes Ausblenden des Sichtfeldes

Abbildung 5.23: Das 2. Konzept des 1. Hilfstools bot dem Nutzer ein interaktives visuelles Feedback. Sobald der Nutzer mit der horizontalen Drehung des Kopfes von einem neutralen Bereich abwich, wurde das Sichtfeld seitlich mit dem Grad der Drehung ausgeblendet. Illustriert wird der transparente Übergang (a) hin zur Intransparenz bei einer Kopfdrehung nach rechts (b).

Das 2. Konzept hatte den Ansatz, dem Patienten einen natürlichen Bereich der Kopfabweichung zu ermöglichen (neutrale Stellung). Dieser Bereich wird fortan als *neutrale Stellung* bzw. Bereich bezeichnet. Für einen fließenden Übergang sollte der gesamte Teil des ausgeblendeten Sichtfeldes die gleiche Transparenz haben. Für die Implementierung wurde ein Bild von der entsprechenden Seite vor das Sichtfeld des Nutzers geschoben. Über die Kamerarotationsdaten (HMD-Orientierung) konnte eine gradgenaue Abweichung von der Neutralstellung (Neutral-Null-Stellung) registriert werden. Mit der Umwandlung der Rotationsdaten auf einen geeigneteren Wertebereich von -180° bis 180° (Eulersche Winkel) ließ sich ein horizontaler Startwinkel für die Abdunkelung des Sichtbereiches und Eingrenzung der neutralen Stellung definieren. Mit der Angabe eines weiteren Winkels konnte definiert werden, ab wann das Bild undurchsichtig sein sollte. Somit konnte die Position des Bildes und die Transparenz interaktiv in Relation zur Kopforientierung angepasst werden.

3. Konzept: Bildmitte

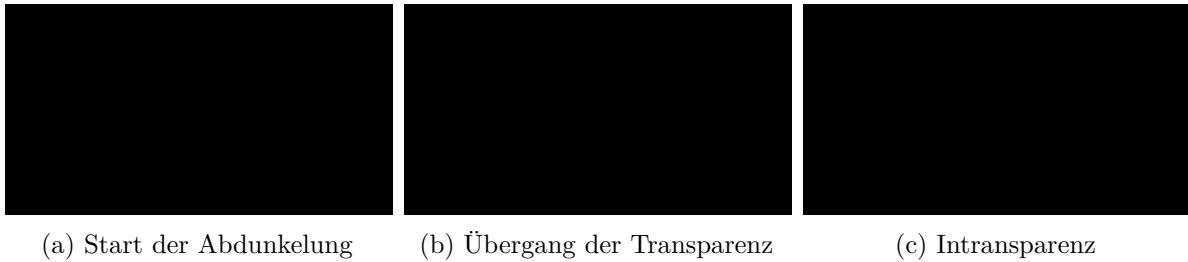


Abbildung 5.24: Das 3. Konzept des 1. Hilfstools bot ein interaktives visuelles Feedback mit der Abdunkelung des gesamten Sichtfeldes. Illustriert wird der Start der Abdunkelung (a) mit einem transparenten Übergang (b) zur Intransparenz (c) bei einer Kopfdrehung nach rechts.

Das 3. Konzept basierte auf dem gleichen Entwicklungsansatz wie das 2. Konzept, dunkelte jedoch das gesamte Sichtfeld des Nutzers bei einer Abweichung von der neutralen Stellung ab.

Bewertung der Konzepte

Während auf der Herstellerseite Angaben zu einem horizontalen FoV von 110° zu finden waren, waren im Programm widersprüchliche Winkelangaben (von 104°) zu finden. Ein Testen des 1. Konzeptes ergab, dass sich der Farbübergang durch die Teilflächen als zu sprunghaft erwies. In der VR bleibt trotz notwendiger Einstellungen außerdem der Eindruck bestehen, sich in einer Kugel zu befinden. Zudem erwies es sich schwierig und unnatürlich, den Kopf durchgehend gerade zu halten, ohne dass Teile des Sichtfeldes bereits ausgeblendet wurden. Infolgedessen wurde das zu schnelle Ausblenden als zu schwer und nicht patientengerecht betrachtet.

Mit der Definition eines Startwinkels und eines neutralen Bereiches boten das 2. und 3. Entwicklungskonzept eine Möglichkeit, ein zu schnelles Abdunkeln des Sichtbereiches zu verhindern. Auch der fließende Übergang der Transparenz überwiegte gegenüber dem 1. Konzept. Im Vergleich verfügte das 1. Konzept über ein visuelles Feedback bei einer vertikalen Kopfbewegung, welches jedoch für die anderen Konzepte nicht benötigt wurde bzw. für den Patienten keine Relevanz hatte. In der Bewertung wurde sich aufgrund der überwiegenden Nachteile dafür entschieden, den Entwicklungsansatz des 1. Konzeptes nicht fortzuführen und zu verwerfen. In der Bewertung wurde das Ausblenden des 2. Konzeptes als unnatürlich betrachtet, sodass die Auswahl des Kopfhaltedefeedbacks auf das 3. Konzept fiel.

Weiterentwicklung

Durch die Aussage drei bestand die Anforderung, den Übergang der Transparenz langsam zu gestalten und das Sichtfeld nicht vollständig abzdunkeln. Entscheidend war es auch, eine freundlichere Farbe für das visuelle Feedback auszuwählen. Die weitere Entwicklung sollte eine geeignete Hilfestellung zum Zurückführen des Kopfes implementieren. Eine Zeitdauer von zehn Sekunden sollte dem Patienten ein Zeitfenster zur eigenständigen Korrektur der Kopfposition zur Verfügung stehen. Bei Ablauf der Zeitdauer sollte ein Pfeil den Weg zurück zur neutralen Stellung weisen. Dort angekommen sollte das gerade gehalten des Kopfes mit einem kreisrunden Ladekreis bestätigt werden. Während der Anzeige der Hilfestellung und der Bestätigung des Ladekreises sollte das Training pausiert werden. Hierdurch sollte eine Überforderung vermieden und dem Verpassen von Trainingsinhalten vorgebeugt werden. Im Entwicklungsprozess wurde sich über mehrere Iterationen und prototypische Versionen den optimalen Parametern angenähert. Der Prototyp 1.5 stellte dem klinischen Partner die Modifikation entscheidender Kenngrößen über Schieberegler zur Verfügung.

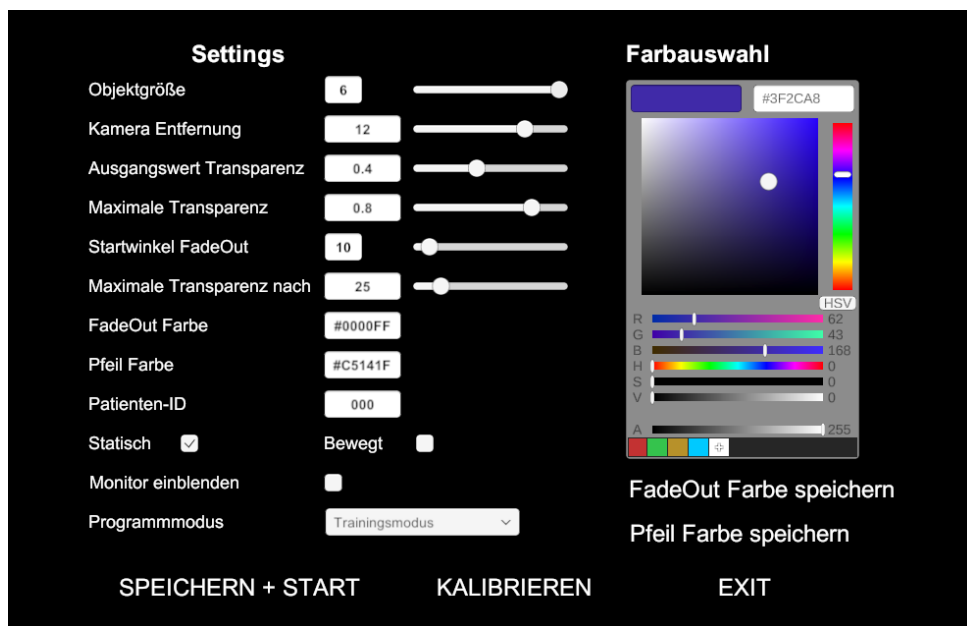


Abbildung 5.25: Die Bedienelemente der Benutzeroberfläche des Prototyps 1.5 um geeignete Parameterwerte für das 1. Hilfstool zu definieren. Über (anwenderfreundliche) Schieberegler konnte der klinische Partner Varianten des Features testen.

Unter *Settings* wurden Parameter für das Training und das Kopfhaltfeedbacks dargestellt. Damit das Einfärben des Sichtfeldes bereits zu Beginn der Kopfabweichung auffiel wurde ein geeigneter Transparenzwert benötigt. Hierfür wurde der Parameter **Ausgangswert Transparenz** bereitgestellt. Die **Maximale Transparenz** hatte das Ziel, den Raum für den Patienten nicht zu weit abzdunkeln um eine durchgehende Orientierung zu

ermöglichen. Neben dem **Startwinkel FadeOut** definierte Der Parameter **Maximale Transparenz nach** den Winkel, zu welchem die maximale Transparenz erreicht werden sollte. Um bei einer Kopfabweichung mit der Anfangstransparenz den festgelegten Transparenzwert gradgenau zu erhalten, wurde eine Gleichung für einen Multiplikator aufgestellt, die bei Veränderung der Eingabeparameter automatisch berechnet wurde. Für das weiterentwickelte Feature konnte zudem eine geeignete Farbgebung in VR erprobt werden. Hierfür bot die *Farbauswahl* in Kombination mit zwei Buttons die Möglichkeit einen Hex-Farbcode auszuwählen. Tabelle 5.2 stellt die Auswahl der Parameterwerte durch den klinischen Partner dar. Bei der Farbgebung wurde bei dem Sichtfeld (**FadeOutColor**) die Signalfarbe Rot (falsch) und bei dem Pfeil (**Pfeil Farbe**) Grün (richtig) ausgewählt.

Tabelle 5.2: Zeigt die Auswahl geeigneter Parameterwerte des 1. Hilfstoos.

Bereiche	Werte
Parameter	(1) Startwinkel FadeOut: 10 (2) Ausgangswert Transparenz: 0.65 (3) Maximale Transparenz: 0.9 (4) Max. Transparenz nach: 25
Farbgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtfeld: Dunkelrot (#4F040A) • Hilfestellung Pfeil: Grün (#0FEE2C)

Ab dem Abweichen des Startwinkels (neutralen Stellung) wurde die Zeitmessung von 10 Sekunden (Timer) gestartet, wobei die Messung bei einem rechtzeitigen Zurückdrehen in die neutrale Stellung zurückgesetzt wurde. Bei Ablauf der Zeitdauer wurde ein grüner Pfeil als Bild entlang des kürzesten Weges zur neutralen Stellung angezeigt. Ein einfacher Texthinweis gab zudem den Hinweis, den Kopf gerade zu halten. Um den Pfeil dynamischer und Auffälliger zu gestalten, wurde eine stetige Pfeilbewegung animiert. Für den Stopp des Trainings wurde zeitgleich die Bewegung der Fließbandobjekte gestoppt und ein Fokussieren durch das Deaktivieren der Kollider verhindert. Sofern der Transport der Fließbandobjekte noch nicht begonnen hatte, wurde sichergestellt, dass dies erst nach Bestätigung des Kopfhaltfeedbacks geschah.

Mit der Drehung zurück in den neutralen Bereich wurde ein kreisrunder Ladekreis eingeblendet. Um sicherzustellen, dass der Patient den Kopf gerade hält, wurde ein Blickstrahl von dem Sichtfeldmittelpunkt der Kamera (HMD-Benutzeransicht) ausgesendet. Der Sichtfeldmittelpunkt wurden dem Patienten durch ein farbiges Fadenkreuz symbolisiert. Die Bestätigung wurde durchgeführt, indem der Strahl (grünes Kreuz) ohne Unterbrechung für drei Sekunden in den Ladekreis (Kollider) gehalten wurde. Bei einem Abweichen (rotes Kreuz) wurde der Ladestatus entsprechend zurückgesetzt. Um dem Patienten den

aktuellen Ladezustand zu visualisieren wurde in der Mitte des Kreises die verstrichene Zeit in Sekunden angezeigt. Nach dem Abspielen eines Bestätigungssounds wurde der Ladekreis mit einer Verzögerung von einer halben Sekunde ausgeblendet und das Training fortgesetzt. Der Ladekreis war bis zu diesem Zeitpunkt undurchsichtig, sodass sowohl der Rand des Kreises und die Zeitanzeige (Nahsicht) als auch das Fließband im Hintergrund (Fernsicht) zu sehen waren. Dieser Effekt wurde bei Tests von zwei Personen als unangenehm empfunden, weshalb der Ladekreis opak gefüllt wurde.

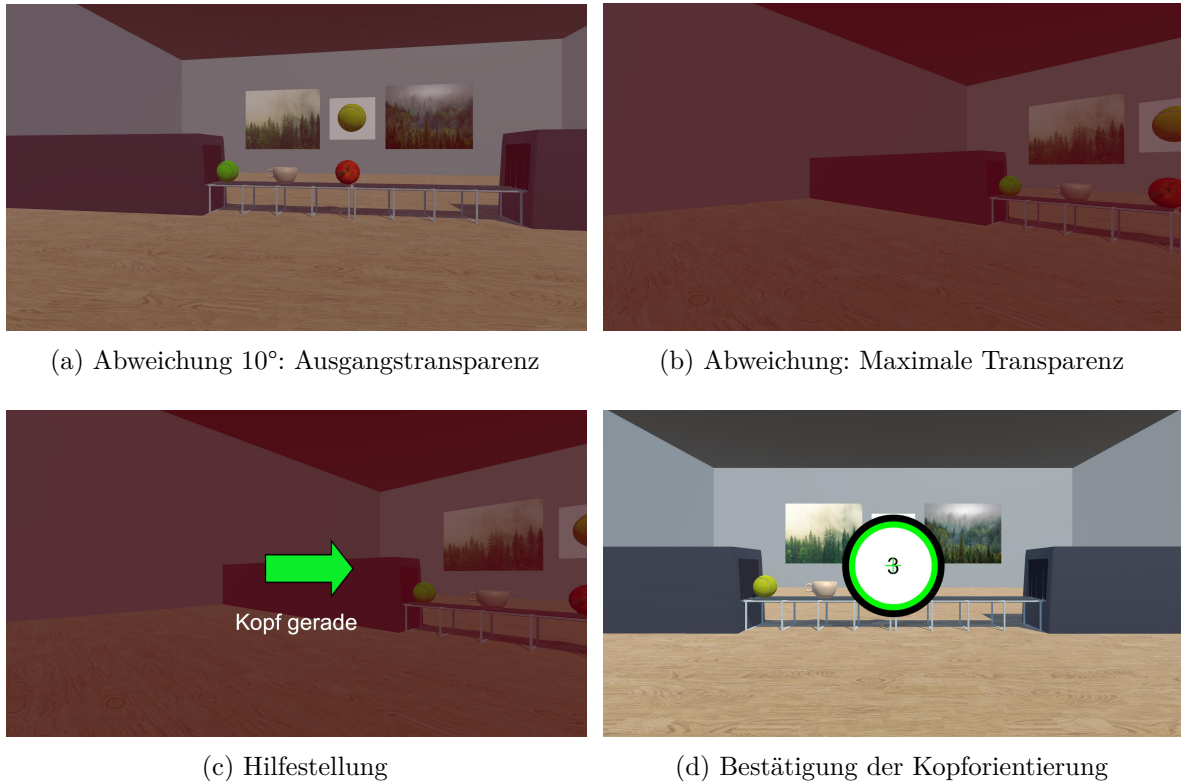


Abbildung 5.26: Darstellung des Kopfhaltedefeedbacks (1. Hilfstool) bei einer Kopfdrehung nach links. Gezeigt wird der Ausgangswert Transparenz (a), die Maximale Transparenz (b), die Hilfestellung (c) sowie die Bestätigung der Kopfstellung mit dem kreisrunden Ladekreis (d).

Patientenfeedback

In der ersten Sitzung der Patientenstudie im UKL wurde ein Patient mit stark ausgeprägtem visuellen Neglect getestet. Während der Testung zeichnete sich ab, dass der Patient den visuellen Hinweis bei einer leichten Kopfdrehung nach vorne links nicht wahrnahm. Um einer Demotivation vorzubeugen und zusätzliche Hilfestellung bereitzustellen, gab die Testleiterin mündliche Hinweise zum Zurückdrehen des Kopfes. Infolgedessen entstand die Anforderung, eine zusätzliche akustische Hilfestellung in das Feature zu integrieren.

- Cogne et al. [38] verwendeten in ihrer Trainingssoftware ein Piepsen als auditive

Hilfestellung für die zielgerichtete Navigation durch eine noramerikanische Stadt. In ihrer Studie hoben sie die verbesserte virtuell räumliche Navigation im Vergleich zur Gruppe ohne Hinweiston hervor.

Inspiziert von Cogne et al. [38] auditive Hilfestellung bestand bereits in früheren Iterationsphasen die Idee, einen ähnlichen Hinweis zu implementieren. Zum damaligen Zeitpunkt wurden jedoch ein rein visuelle Hinweise als Hilfestellung präferiert. Nach einer Recherche wurde ein geeigneter Sound ausgewählt und die Lautstärke erhöht, sodass der Hinweiston in Relation zu der Lautstärke der anderen Sounds deutlich wahrgenommen wurde. Wicht der Patient von der neutralen Stellung ab, wurde der Sound in Dauerschleife auf der entsprechenden Kopfhörerseite abgespielt. Mit dem Wiedereintreten in den neutralen Bereich wurde der Sound wieder gestoppt.

5.5.2 2. Hilfstool (kontraläsionaler Hinweis)

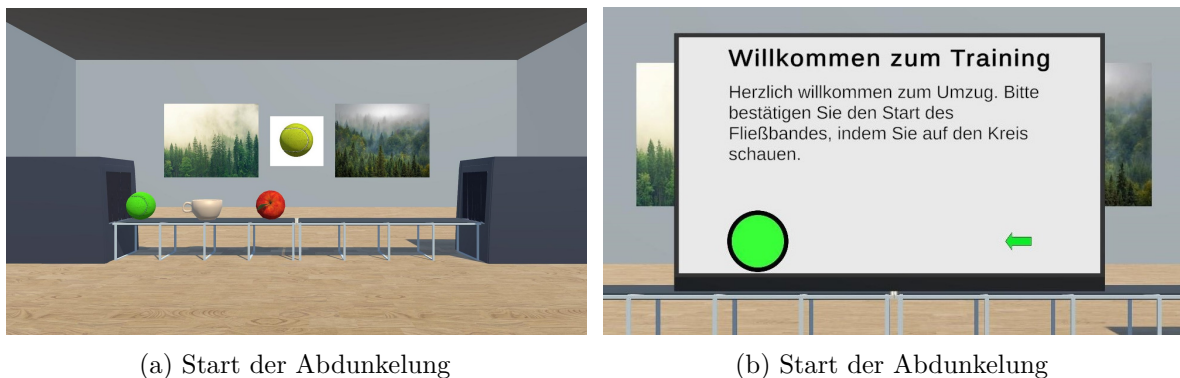


Abbildung 5.27: Darstellung der 2. Hilfestellung zur Lokalisation des Zielobjektes oder ET-Displaybuttons. Durch das grün blinkende Hervorheben erhielt der Patient einen visuellen Hinweis. Zur Lokalisation wird des Displaybuttons wurde zusätzlich ein grüner Pfeil eingeblendet, der den Weg zum Button wies.

- Im VR-Training von Yasuda et al. [37] war es die Aufgabe, Objekte im extrapersonalen Bereich von rechts nach links zu benennen, nachdem diese für sechs Sekunden visuell blinkend hervorgehoben wurden.

Inspiziert von Yasuda et al. wurde ein ähnlicher Ansatz entwickelt. Für die Beachtung des Zielobjektes auf der kontraläsionalen Seite wurde ein geeigneter visueller Hinweis benötigt. Der Hinweis sollte dem Patienten dabei helfen, die Nutzerbestätigung vor dem Ausgang des Fließbandes durchzuführen. Hierbei wurde der Hinweis erst nach einer gewissen Zeitdauer zur Verfügung zu stellen, sodass der Patient die Gelegenheit bekam, das Objekt eigenständig zu lokalisieren. Für die Hervorhebung wurde das Objekt vollständig in der

Farbe Grün (richtig) eingefärbt. Sobald das Zielobjekt vor dem Eingang zum stehen kam, wurde ein Skript aktiviert. Nachdem das Zielobjekt für zehn Sekunden nicht fokussiert wurde, wurde es blinkend hervorgehoben. Hierfür wurden die Farbwerte des Objektes mit einer definierten Geschwindigkeit zwischen den ursprünglichen Farben und dem grünen Farbton linear interpoliert. Sobald zu dem Objekt Blickkontakt bestand, wurden die ursprünglichen Farbwerte erneut zugeordnet. Abb. 5.27 stellt die aktivierte Hilfestellung für das Trainingslevel eins dar.

Für das ET-Interaktionskonzept mit dem Displaybutton wurde eine Hilfestellung nach dem gleichen Prinzip entwickelt. Nach dem Einblenden des Buttons hatte der Patient fünf Sekunden Zeit, den Button für eine Bestätigung eigenständig anzuschauen. Sobald die Zeit ablief, wurde der Button grün blinkend hervorgehoben. Zusätzlich wurde die Animation einer grünen Pfeilbewegung von rechts nach links aktiviert. Der Pfeil verfolgte das Ziel, dem Patienten den Weg zum Ziel zu weisen. Abb. 5.27 stellt die aktivierte Hilfestellung zur Bestätigung eines Trainings dar.

5.6 Datenerfassung

Für die Dokumentation wurde ein geeigneter Ablauf zur Aktivierung und Deaktivierung der Datenerfassung entwickelt. Hierbei wurden die Logdateien in einem lokalen Dateipfad gespeichert. Der Dateiname setzte sich zur Identifikation aus der Kategorie (z.B. *Log-Events*), dem Programmmodus, der Patienten-ID und dem aktuellen Datum zusammen. Die Dokumentation der Datenerfassung wurde auf vier separate Log-Dateien aufgeteilt. Zur Dokumentation der Kopffrotation beinhaltete die Log-Datei *HeadRotations* die Orientierungsdaten des HMD. In der Log-Datei *Events* wurden sämtliche Ereignisse des Programmablaufes und der Interaktion des Nutzers in Form spezifischer Einträge gespeichert. Um dem klinischen Partner möglichst viele relevante Daten zum ET zur Verfügung zu stellen, wurde zusätzlich auf relevante Daten des sRanipal SDK zugegriffen, sodass diese in der Auswertung ergänzend zu den Daten des Tobii SDK genutzt werden konnten. Hierfür wurden die Daten der SDK in einer separaten Log-Datei mit dem Namen des SDK gespeichert.

Tabelle 5.3: Auflistung der Programmodi für die Dokumentation der Einträge in den Log-Dateien.

Nummer	Bezeichnung
0	Tutorial 1
1	Trainingslevel 1
2	Trainingslevel 2
3	Trainingslevel 3
4	Trainingslevel 4
5	Trainingslevel 5
6	Trainingslevel 6
7	Tutorial 2
8	Tutorial 3
9	Tutorial 4

Um einen Datenverlust vorzubeugen, wurden die Einträge nach dem Start eines Programmes laufend in die vier Log-Dateien geschrieben. Im Folgenden werden der Aufbau der Dateien und die Eintragsarten erläutert. Der generelle Aufbau aller Log-Dateien umfasste fünf Parameter, welche sich in jeder Log-Datei zu Beginn der Kopfzeile wiederfanden.

- **1. Der Programmmodus:** Eine Nummer von 0-9 (Tab. 5.3).
- **2. Die Trainingsiteration:** Eine Zahl von 1 – 7. Für ein Trainingslevel oder Tutorial wurde so die Iteration (T-P-T-P-T-P-T) zwischen Trainings- und Pausenszene gespeichert, wobei sieben für die Darstellung der Trainingsperformance in der Trainingsszene stand.
- **3. Zeit [s]:** Die Zeit seit dem Programmstart in Sekunden mit drei Nachkommastellen.
- **4. Datum:** Das heutige Datum im Format yyyy-mm-dd, z.B. 2023-03-07.
- **5. Uhrzeit:** Die aktuelle Uhrzeit, z.B. 18:05:39:12.

Um die Auswertung der Daten zu erleichtern, wurde zum Ende und bei Abbruch eines Programmmodus die Trainingsperformance in der Log-Datei Events abgespeichert. Neben den vielen Einträgen des Programmablaufes beinhalteten die Ereignisse des ET unter anderem den Start und das Ende eines Blickkontaktes zu einem Fließbandobjekt.

Die wichtigsten Parameter der ET Log-Dateien umfassten neben der Validität den Ursprung und die Richtung des Blickstrahles, die Konvergenzdistanz bei Blickkontakt, den Durchmesser der Pupille sowie die Information, ob das Auge geschlossen ist (0-1 oder true/false). Für einen registrierten Blickkontakt wurden zusätzlich Einträge zum Objekt dokumentiert,

wie der Objektname, der Objekttyp (Zielobjekt oder falsches Objekt) und die zurückgelegte Strecke bzw. Flugstrecke (0-1). Während die ET Informationen zum Fokussieren eines Objektes in der Log-Datei Events übersichtlichkeithalber als Ereignis auftauchten, wurden die Einträge in den zwei ET Log-Dateien durchgehend mitgeschrieben.

5.7 Therapeutenoberfläche

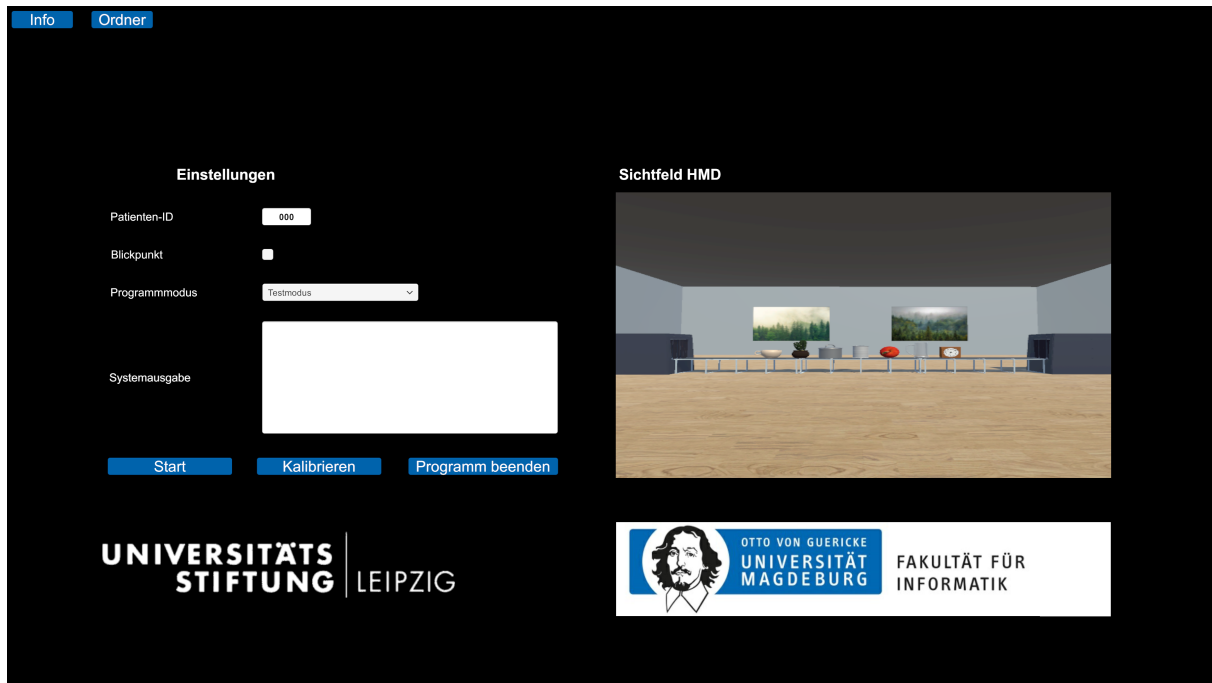


Abbildung 5.28: Darstellung der finalen Therapeutenoberfläche zur Bedienung der VR-Trainingsanwendung. Neben den Bedienelementen konnte der Therapeut die HMD-Ansicht des Patienten im Basisraum betrachten.

Die finale Benutzeroberfläche teilte sich in die Bereiche *Einstellungen* und *Sichtfeld HMD* auf. Abb. 5.28 zeigt die finale Gestaltung des Menüs zur Steuerung der Anwendung. Zum Start des Programmes befand sich der Nutzer im Basisraum. Die Raumkonstellation stellte den Ausgangspunkt vor dem Start eines Programmmodus dar. In der VU konnte der Patient die Objekte auf dem Fließband sehen, jedoch nicht mittels ET mit ihnen interagieren. Über die Einstellungen konnte der Therapeut eine Patienten-ID zur Benennung der Log-Dateien angeben, den Blickpunkt aktivieren oder deaktivieren sowie einem Programmmodus auswählen. Vor dem Start des Programmes war es notwendig die ET-Kalibrierung durchzuführen. Mit dem Menübutton *Kalibrieren* konnte die 5-Punkte ET-Kalibrierung der HTC Vive Pro Eye gestartet werden. Für eine simple Bedienung wurde dem Therapeuten in der Systemausgabe mitgeteilt, ob die Kalibrierung erfolgreich durchgeführt werden konnte und ob das aktuell gespeicherte Kalibrierungsergebnis ausreichend war.

Zum Testen des Kalibrierungsergebnisses und der IT-Interaktion konnte der Testmodus gestartet werden, wodurch der Patient mit den 7 Fließbandobjekten interagieren und eine genaue Objektdifferenzierung testen konnte. Sofern das Ergebnis befriedigend war, konnte ein Tutorial oder Trainingslevel gestartet werden. Um ein überschreiben bestehender Log-Dateien zu verhindern wurde mit der Betätigung des Startbuttons geprüft, ob die Dateien im Dateipfad bereits existierten. War dies der Fall wurde der Start abgebrochen und der Nutzer in der Systemausgabe eine Benachrichtigung zu den entsprechenden Dateinamen.

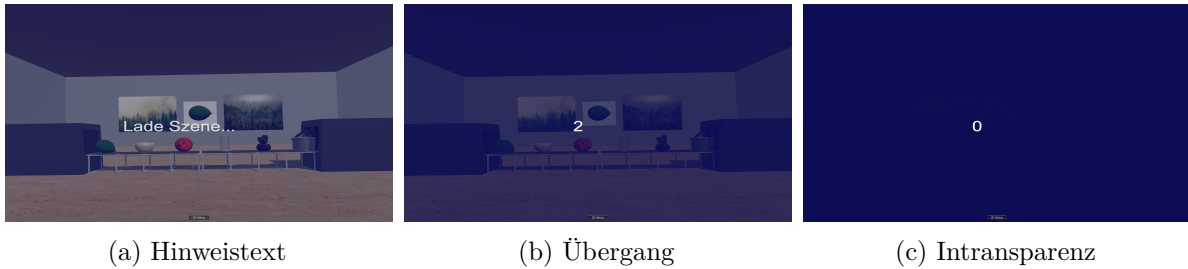


Abbildung 5.29: Darstellung des Szenenwechsels zum Vorbeugen von Cybersickness. Mit der Anzeige eines Hinweistextes und drei Sekunden Countdowns wurde das Sichtfeld hin zur Intransparenz abgedunkelt und in der neuen bzw. veränderten VU wieder aufgeklärt.

Szenenübergang. Um zum Start eines Programmmodus oder Szenenwechsels Cybersickness vorzubeugen wurde ein geeigneter Übergang implementiert. Das Ziel hierbei war es, die plötzliche Veränderung der Raumgestaltung mit dem Ein- und Ausblenden von Fließbändern oder den Wechsel in die neue VU im Sichtfeld zu verdecken. Mit der Anzeige eines Hinweistextes und drei Sekunden Countdowns wurde das Sichtfeld hin zur Intransparenz abgedunkelt, sodass der Nutzer die Umgebung nicht mehr sehen konnte. Nach der Umgestaltung folgte für das Aufklaren des Sichtfeldes ein kurzer Wechsel zur Intransparenz. Abb. 5.29 stellt den Vorgang zum Abdunkeln des Sichtfeldes dar.

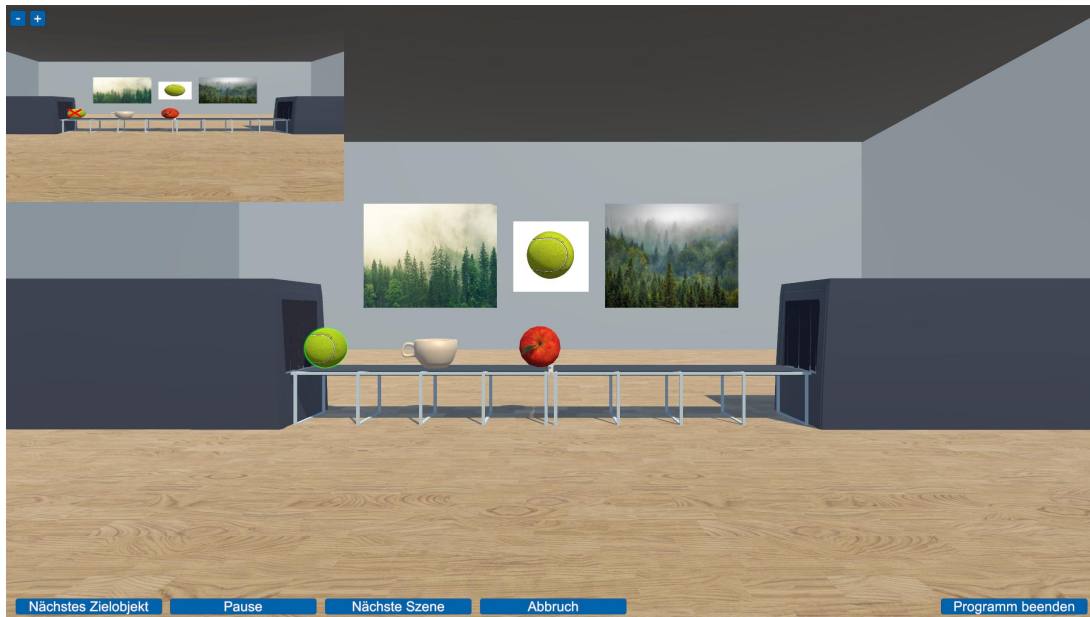


Abbildung 5.30: Darstellung der Therapeutenoberfläche in der Trainingsszene bei der Fokussierung des Zielobjektes.

Im gestarteten Programmmodus wurden die Steuerungsbuttons angezeigt. Des Weiteren wurden die Trainingszeit der Trainings- oder Pausenszene und ein Countdown zur noch verbleibenden Zeit angezeigt. Hierbei startete der 5-Minuten-Countdown der Trainingsszene erst nach der Nutzerbestätigung zum Trainingsstart. Die Buttons konnten zur Bestätigung eines Zielobjektes oder Textes, dem Pausieren und Starten, dem Wechsel in die nächste Szene (Trainingsiteration), Abbrechen und Rückkehren in den Basisraum oder direkten beenden des Programmes verwendet werden. Für die Darstellung des Blickpunktes wurde dem Therapeuten ein weiteres Tool zur Verfügung gestellt.

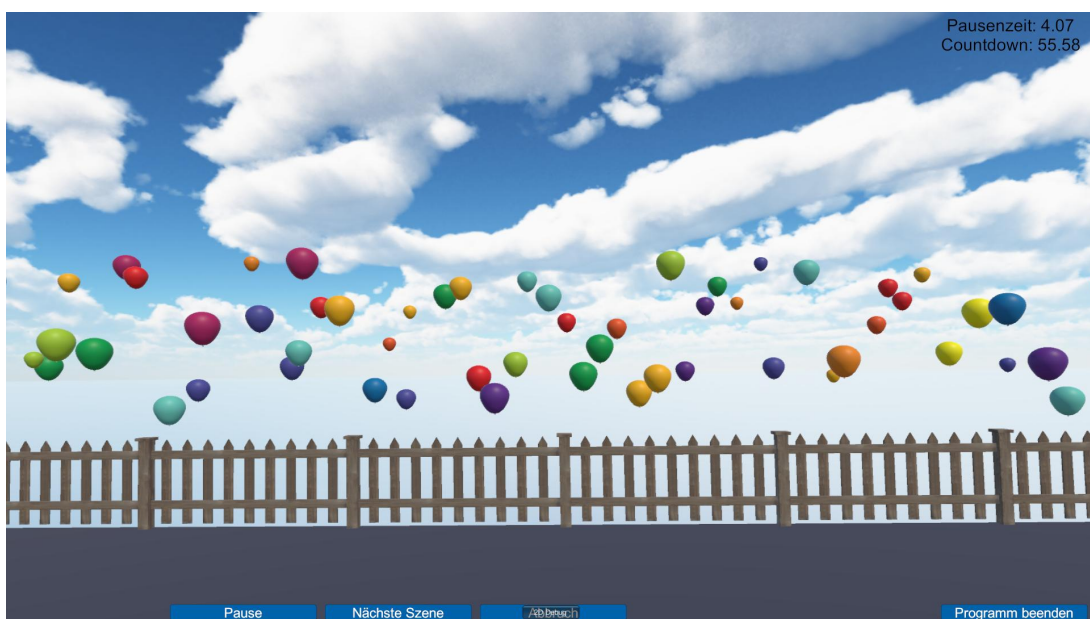


Abbildung 5.31: Darstellung der Therapeutenoberfläche in der Pausenszene.

Blickpunkt. Die Idee bestand darin, dem Therapeuten den aktuellen Blickpunkt des Nutzers darzustellen, sodass dieser im Notfall den Blick des Patienten zum Ziel verbal lotsen konnte. Durch die Verwendung eines SDK-Features ließ sich der Blickpunkt im Sichtfeld des HMD visualisieren. Damit der Blickpunkt nur auf der Therapeutenoberfläche sichtbar war, wurde ein geeignetes Feature entwickelt. Durch das Aktivieren des Blickpunktes im Menü wurde im gestarteten Programm ein separates Fenster angezeigt. Durch die Verwendung von zwei Buttons ließ sich mit dem Tool die Fenstergröße skalieren. Um einen besseren Kontrast zum Hintergrund darzustellen wurde für die Visualisierung des Blickpunktes ein rotes Kreuz ausgewählt. Abb. 5.30 stellt die Visualisierung des Blickpunktes bei der Fokussierung des Zielobjektes Tennisball dar.

Nachdem der Patient zum Trainingsende seine Performance begutachtet hatte gelangte er automatisch zurück in den Basisraum, sodass das Menü erneut geöffnet wurde. Um eine einfache Datenverwaltung zur Verfügung zu stellen konnte zuletzt mit den Buttons *Ordner* der lokale Speicherpfad im Explorer und mit *Info* das Benutzerhandbuch geöffnet werden.

6 Evaluation

Die Evaluation hatte das Ziel herauszufinden, inwieweit bei der Durchführung des VR-Trainings Nebenwirkungen auftreten. Zu diesem Zweck wurde eine Studie mit Teilnehmern ohne Neglect in der Otto-von-Guericke Universität (OVGU) in Magdeburg und mit Neglect im UKL durchgeführt werden. Durch den Einsatz quantitativer Fragebögen wurde das subjektive Auftreten von Cybersickness und die Usability des VR-Trainings bewertet werden. Hierbei war es das Ziel, durch die Studienleitung herauszufinden, ob der Patient das Training alleinig mithilfe der Tutorials absolvieren kann. Die Ergebnisse des qualitativen Fragebogens sollen Aufschluss über die Stärken und Schwächen des VR-Trainings geben. Die Unterschiede zwischen den Teilnehmergruppen werden aufgrund der geringen Patientenzahl ausschließlich deskriptiv ausgewertet, sodass die Ergebnisse der Patientenstudie nur als Indiz assoziiert werden können. Zur Durchführung der Tests wurde die bereits in Abs. 5.2 beschriebene Hardware verwendet.

Im Folgenden wird der Begriff der Usability erklärt und die Auswahl der verwendeten Fragebögen zur Datenerhebung begründet. Anschließend werden die Durchführung und die Ergebnisse des Expertentests und der Studie dargelegt.

6.1 Fragebögen

6.1.1 Expertenfragebogen

Die Items des Expertenfragebogens sollten die qualitative Meinung der Experten zu den Stärken und Schwächen, der Eignung, dem Nutzen der Hilfestellungen sowie den Bedarf fehlender oder weiterer Features des VR-Trainingssystems evaluieren. Abb. A.5 stellt die entwickelten Fragen dar.

6.1.2 Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire

Brown et al. [42] bestätigen für den Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) mit ihrer Studie die Annahme, dass für klinische Populationen mit chronischen Schmerzen wie Neglect-Patienten nicht von einem SSQ-Ausgangswert (*zero baseline*) von null ausgegangen

werden kann. Zudem konnte gezeigt werden, dass Cybersickness Symptomatiken nach einer VR-Intervention niedriger sein können.

Für die Bewertung der Cybersickness wurde sich für den *Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire* (CSQ-VR) entschieden. Im Vergleich zum SSQ wiesen Kourtesis et al. dem Fragebogen eine höhere interne Konsistenz der Fragen zueinander nach und sprachen durch die höhere Punkteanzahl der Likert Skala von einer größeren Vielfalt der Antwortmöglichkeiten [32]. Der CSQ-VR erfasst das Auftreten und die Stärke von Cybersickness für VR-Anwendungen. Die Bewertung erfolgt anhand von sechs Fragen in einer sieben Punkte Likert-Skala ("1-abwesendes Gefühl" bis "7-extremes Gefühl"). Mit je zwei Fragen je Symptom bewertet der CSQ-VR Nausea (Übelkeit, Schwindel), Vestibular (Desorientierung, Gleichgewichtsprobleme) und Oculomotor Symptome (Visuelle Erschöpfung und visuelles Unwohlsein). Das Gesamtergebnis ergibt sich aus der Summe der drei Bereiche [32]. Der maximale Wert (Symptom Intensität) einer Frage ist sieben. Je Kategorie ergibt sich ein Wert von maximal 14. Das Gesamtergebnis (Score) beträgt maximal 42. Um zu verhindern, dass die VR-Intervention fälschlicherweise als Auslöser für Cybersickness induzierte Symptomatiken betrachtet wird, wurde die Befragung der Teilnehmer mit Neglect vor und nach der Testung durchgeführt. Um die Testung zu vereinheitlichen, wurden die Daten für Teilnehmer ohne Neglect ebenfalls vor und nach der Testung erhoben.

Während die Teilnehmer ohne Neglect über ausreichende englische Sprachkenntnisse verfügten, wurde für die Teilnehmer mit Neglect der Fragebogen ins Deutsche übersetzt, sodass möglichst sichergestellt wurde, dass alle Teilnehmer die Fragen verstehen. Weil sich für den CSQ-VR keine standardisierte Übersetzung finden ließ, wurde der Fragebogen eigenständig übersetzt. Abb. A.8 und Abb. A.9 stellt die Übersetzung des Fragebogens dar.

6.1.3 User Satisfaction Evaluation Questionnaire

Der Begriff Usability (Gebrauchstauglichkeit, Benutzerzufriedenheit) wird nach der Norm ISO 9241-11 definiert als „das Ausmaß, in dem ein Produkt von bestimmten Benutzern verwendet werden kann, um bestimmte Ziele mit Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit in einem bestimmten Nutzungskontext zu erreichen [43].^{25, 26} Abb. A.10 stellt die Übersetzung des Fragebogens ins Deutsche dar.

Virtuelle Rehabilitationssysteme werden eingesetzt, um klinische Experten und Patienten bei der Rehabilitation zu unterstützen. Der *System Usability Scale* Fragebogen ist ein

25: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 129: Leitlinien für die Individualisierung von Software - <https://www.beuth.de/de/norm/iso-9241-129/137144633>

26: ISO 9241-11:2018(en) - Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability: Definitions and concepts - <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>

bekannter Fragebogen, der die Usability eines Computersystems bewertet. Hierbei schließt er im Allgemeinen viele Produkte ein, beinhaltet jedoch keine Fragen zur virtuellen Rehabilitation, weshalb sich für die Verwendung des *User Satisfaction Evaluation Questionnaire* (USEQ) entschieden wurde [43]. Der USEQ wurde speziell für die Bewertung der Usability virtueller Rehabilitationssysteme entwickelt. Für die Bewertung gibt der Proband seine Zustimmung zu sechs Fragen in einer fünf Punkte Likert-Skala an („Stimme gar nicht zu“ (1) – „Stimme voll zu“ (5)). Mit fünf positiven und einer negativen Frage ergibt sich ein Ergebnisbereich von sechs (schlechte Benutzerfreundlichkeit) bis 30 Punkten (exzellente Benutzerfreundlichkeit) [43].

6.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Expertenfragebogens und der Studie erläutert.

6.2.1 Expertenfragebogen

Die Tabellen 6.1 bis 6.5 geben eine Übersicht über die qualitativen Antworten der Experten. Für die Teilnehmer des UKL wird der Beruf, das Geschlecht und das Alter wiedergegeben. Die Durchführung erfolgte in späteren Iterationen des Entwicklungsprozesses mit dem Prototyp 2.0. Die fünf Teilnehmer hatten eine medizinische Ausbildung oder eine Dienst-tätigkeit im UKL. Zur Erhebung der Expertenmeinungen wurde ein VR-Training und eine anschließende Befragung durch das Ausfüllen des Expertenfragebogens durchgeführt. Das VR-Training umfasste das erste Tutorial und nach zeitlicher Verfügbarkeit ebenfalls das Trainingslevel eins.

Tabelle 6.1: Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 1-2 des Expertenfragebogens.

Teilnehmer	A: Orthoptistin, weiblich, 44 B: Psychologisch technische Assistentin, 47 C. Neuropsychologin, weiblich, 37 D. Studentin/Praktikantin, weiblich, 23 E. Student, männlich, 30
Frage 1	Wie geeignet finden Sie die VR-Trainingssoftware als zusätzliche Unterstützung für die Behandlung?
A1	- wenn noch kein OKS-Programm vorhanden in Klinik gut als OKS-Programm - geeignet als Trainingsprogramm für zu Hause
B1	- gut geeignet, motiviert sehr zum Training
C1	- gut geeignet! - Interessantes, alltagsnahes Medium & abwechslungsreich im Vergleich zu herkömmlichen PC-/Papier-/Bleistiftaufgaben
D1	- Mir erscheint die VR-Trainingssoftware sehr hilfreich zu sein, da sie auf spielerische Weise die Patienten motiviert zu trainieren. - VR-Systeme besitzen zudem das Potenzial, Trainingsprogramme an Patienten individuell anzupassen
E1	/
Frage 2	Ich empfinde die folgenden Merkmale als Stärken.
A2	- sichtbar werden von genauen/präzisen Verfolgen des Zielobjektes sowie dem Halten des Blickes auf betroffene Seite - bewusst machen von Kopfdrehungen - die Pausen zwischendurch
B2	- Die VR selbst anderes Trainingsmaterial als sonst üblich ->modern
C2	- 3D-Raum, neu/interessant als Medium per se, wirkt modern, alltagsnah, immersiv, Fokussierung notwendig, wenig externe Hilfe notwendig
D2	- Das Eye-Tracking hat sehr gut funktioniert. Wenn ich etwas anderes fixiert habe, hat das System es zudem sehr schnell erkannt - Die Pfeile und farblichen Hinweise, wenn der User etwas falsches fixiert, finde ich als sinnvolle Hilfen
E2	- Feedback/Kontrolle des Blickpunktes sowie Kopfdrehung

Tabelle 6.2: Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 3-4 des Expertenfragebogens.

Teilnehmer	A: Orthoptistin, weiblich, 44 B: Psychologisch technische Assistentin, 47 C. Neuropsychologin, weiblich, 37 D. Studentin/Praktikantin, weiblich, 23 E. Student, männlich, 30
Frage 3	Ich empfinde die folgenden Merkmale als Schwächen.
A3	<ul style="list-style-type: none"> - etwas zu lange Instruktion - Zur Bestätigung der Instruktion darf der Blick auf Kreis nicht gewinkert werden - etwas zu enger Abstand zwischen Objekten
B3	- Die aktuelle Version hat hier und da noch kleine Wackler
C3	- An den Rändern teils weniger scharf gesehen, für die Augen recht anstrengend
D3	- In Szenen 2 und 3, in denen mehrere Fließbänder mit Gegenständen waren, hat der Eyetracker manchmal nicht funktioniert. Das war vor allem der Fall, wenn in der Reihe unter dem zu fixierenden Objekt ein Gegenstand war, der größer war oder etwas nach oben ragte. Obwohl ich das richtige Objekt anschaute, dachte das System, ich würde fälschlicherweise den unteren Gegenstand anschauen
E3	/
Frage 4	Wie beurteilen Sie den Nutzen der ersten Hilfestellung, um die Suche nach dem Eyetracking-Displaybutton zu erleichtern?
A4	<ul style="list-style-type: none"> - gut - Hinweis: bei starken Neglect ET-Displaybutton besser in Mitte, Hinweis mit Pfeil belassen
B4	<ul style="list-style-type: none"> - Für den Patienten einfach in der Durchführung. Wenn damit die Kalibrierung noch erfolgt ->seht gut
C4	- sehr gut
D4	<ul style="list-style-type: none"> - Die Auffälligkeiten des blinkenden Buttons und des Pfeils sind meiner Meinung nach effektive Maßnahmen, um bei Patienten mit Neglect die Aufmerksamkeit zu lenken - Hier ist mir aufgefallen, dass die Zeit von vorne begann, wenn sich mein Gesicht leicht bewegte oder mein Auge einen anderen Punkt in dm Kreis fixiert
E4	- sehr hilfreich

Tabelle 6.3: Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 5-6 des Expertenfragebogens.

Teilnehmer	A: Orthoptistin, weiblich, 44
	B: Psychologisch technische Assistentin, 47
	C. Neuropsychologin, weiblich, 37
	D. Studentin/Praktikantin, weiblich, 23
	E. Student, männlich, 30
Frage 5	Wie beurteilen Sie den Nutzen der zweiten Hilfestellung, um den Kopf gerade zu halten?
A5	<ul style="list-style-type: none"> - Pfeil in welche Richtung = nützlich - 10 s Kopfabweichung kürzen = sehr lang - für den Kopf zurück in Mitte - Bestätigung verbal oder Hilfe durch Erscheinen und Ladekreis nötig durch VR-Brille (haben vielleicht mit VR-Brille kein Gefühl, wann gerade)
B5	- sehr gutes Feedback
C5	- Gut. Ggf. ist die Instruktion zu lang & kann mit anderen Hinweisen kombiniert werden.
D5	- sehr klare Hilfestellung. Die rote Abdunklung des Sichtfeldes macht es zudem sehr deutlich, dass man den Kopf in eine falsche Richtung gedreht hat.
E5	- sehr hilfreich
Frage 6	Wie beurteilen Sie den Nutzen der dritten Hilfestellung, um die Suche nach dem Zielobjekt zu erleichtern?
A6	- so belassen und zusätzlich verbale Aufforderung gut, Zielobjekt erneut aufzusuchen bei Neglect wird das Blinken eventuell gar nicht visuell wahrgenommen, wenn er von Reizen abgelenkt ist
B6	- auch ok
C6	- gut
D6	- Die Hilfestellung fand ich sehr hilfreich, besonders dadurch, dass das richtige Objekt grün umrandet wurde (und falsche Objekte rot)
E6	- Für Neglectpatienten:innen sicherlich auch hilfreich. Ist mir im Training nicht begegnet

Tabelle 6.4: Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 7-8 des Expertenfragebogens.

Teilnehmer	A: Orthoptistin, weiblich, 44 B: Psychologisch technische Assistentin, 47 C. Neuropsychologin, weiblich, 37 D. Studentin/Praktikantin, weiblich, 23 E. Student, männlich, 30
Frage 7	Welche weiteren Hilfestellungen halten Sie ggf. für sinnvoll?
A7	/
B7	<ul style="list-style-type: none"> - Keine weiteren. - Sound wird es zu viel, weniger eingeschränkte Patienten könnten sich bald genervt fühlen
C7	<ul style="list-style-type: none"> - "Halten Sie den Kopf gerade"?! War mir während der Untersuchung unsicher.
D7	<ul style="list-style-type: none"> - Ich fand, es seht hilfreich, dass nach jeder Aufgabenerklärung ein Erklärungsfilm vorgespielt wurde. Ich denke, dass diese visuelle Komponente den Patienten sehr gut veranschaulicht, was von ihnen in der Aufgabe erwartet wird, jedoch war bei mir das Video im Bildschirm schräg.
E7	<ul style="list-style-type: none"> - Kurze Ergebnisdarstellung nach jedem Durchlauf (Transport)
Frage 8	Wie geeignet finden Sie die beiden VR-Umgebungen (Trainings- und Pausenszene)?
A8	<ul style="list-style-type: none"> - Kurze Ergebnisdarstellung nach jedem Durchlauf (Transport) - Trainingsszene: Laufband gut, minimalistisch - Pausenszene: gut, weil entspannend
B8	<ul style="list-style-type: none"> - Die Pausenszene mit den Luftballons ist sehr schön. Der Balkon könnte eventuell etwas möbliert sein. Und zusätzliche Entspannungsmusik könnte den Effekt verstärken. - Der andere Hintergrund hat für mich wenig Bedeutung gehabt. - sehr hübsch. Als Pause wäre alternativ auch Augen schließen & erholen (z. B. mit Musik?) sinnvoll
C8	/
D8	<ul style="list-style-type: none"> - Pausenszene: sehr angenehme Szenerie, wobei Patienten trotzdem noch stimuliert und motiviert werden, nach links und rechts zu schauen. Auch sehr schön farblich gestaltet. ->Optimierungsvorschlag - Trainingsszene: gut geeignet, um das Schauen in bestimmte Richtungen zu trainieren.
E8	<ul style="list-style-type: none"> - Etwas zu steril!?

Tabelle 6.5: Zeigt die qualitativen Antworten für die Fragen 9-10 des Expertenfragebogens.

Teilnehmer	A: Orthoptistin, weiblich, 44 B: Psychologisch technische Assistentin, 47 C. Neuropsychologin, weiblich, 37 D. Studentin/Praktikantin, weiblich, 23 E. Student, männlich, 30
Frage 9	Welche weiteren Merkmale der VR-Umgebung betrachten Sie ggf. als sinnvoll?
A9	<ul style="list-style-type: none"> - für Trainingsszene: Hintergrund neutral und nur Zielobjekt - beide Bilder an der Wand können ablenken - kann aber auch als Orientierung hilfreich sein
B9	- etwas mehr "Deko", um es etwas hübscher aussehen zu lassen. Allerdings wären das optische Ablenker, die in den höheren Level vielleicht gewollt sein könnten
C9	/
D9	/
E9	/
Frage 10	Ich denke, dass die folgenden Aspekte in der VR-Trainingssoftware fehlen und dass ihre Implementierung einen zusätzlichen Nutzen bringen würde.
A10	<ul style="list-style-type: none"> - Steigerung von Tempo des zu verfolgenden Zielobjektes - guter Kontrast der Objekte und dickere Linie (grün bei richtigem Zielobjekt, rot wenn falsch)
B10	- Vielleicht ein paar Geräusche einbauen, z. B. wenn sich eine Klappe öffnet, um das ganze noch realistischer zu gestalten. Bzw. könnte das auch nebenbei das Startsignal sein, um die Aufmerksamkeit des Patienten zu bekommen
C10	/
D10	<ul style="list-style-type: none"> - für die Pausenszene: 1. der "Richtungsflow" der Ballons könnte an die visuelle Neglectseite des Patienten individuell angepasst werden (Also entweder Flow nach rechts ->links oder links ->rechts), um das Training zu vertiefen - Auf der Neglectseite des Patienten könnten besonders auffällige Ballons plötzlich angezeigt werden, um die Wahrnehmung dieser Raumhälfte zu versuchen, zu trainieren
E10	/

6.2.2 Studienergebnisse

In der Studie nahmen sieben Teilnehmer ohne Neglect und drei Teilnehmer mit Neglect teil. Die Probandenstudie wurde mit den Teilnehmern ohne Neglect in der OVGU durchgeführt. Als erstes wurde den Teilnehmern der Zweck des VR-Trainings erklärt. Daraufgehend wurde das erste Tutorial durchgeführt, sodass die Interaktion mit dem Systems verständlich wurde. Um einer Unterforderung der Teilnehmer ohne Neglect vorzubeugen, wurde für das VR-Training das Trainingslevel fünf ausgewählt. Im Voraus wurde kurz das Trainingsprinzip mit zwei Fließbändern und wechselnden Zielobjekten erläutert. Im Anschluss wurde das Training durchgeführt. Für die Datenerfassung wurden die englischsprachigen Fragebögen des USEQ und CSQ-VR verwendet. Weil sich die Frage sechs (Q6, Abb. [A.11](#)) an eine betroffene Person zum Nutzen der Rehabilitation richtete und sich die Teilnehmer thematisch zu wenig auskannten, fiel es den Teilnehmern schwer, eine Einschätzung zum allgemeinen Nutzen der Rehabilitation abzugeben. Infolgedessen wählten alle Teilnehmer, abgesehen von einer Probandin, die Antwort drei auf der Likert Skala als "neutrale" Antwort aus. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse der beiden Gruppen zusätzlich für die Fragen eins bis fünf gegenübergestellt.

Die Patientenstudie (Teilnehmer mit Neglect) wurde im UKL durchgeführt. Das VR-Training beinhaltete das erste Tutorial und das Trainingslevel eins. Der Teilnehmer der ersten Sitzung zeigte sich während des Tests zu erschöpft um das Training fortzuführen, sodass das Training zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt wurde. Des Weiteren entstand in dem ersten Patiententest die Anforderung, ein akustisches Feedback als zusätzliche Hilfestellung zu implementieren, sodass die Wiederholung der Sitzung und darauffolgende Tests mit einer anderen Programmversion durchgeführt wurden. Tab. [6.6](#) stellt für beide Teilnehmergruppen das Alter und die Ergebnisse des USEQ und CSQ-VR als deskriptive Statistik dar.

Tabelle 6.6: Die Tabelle stellt die Ergebnisse der Studie als deskriptive Statistik dar. Neben dem Alter der Teilnehmer und den Scores des USEQ werden die kategorisierten Scores des CSQ-VR vor (Prä), nach (Post) und als Vergleich (Diff) dargestellt. Positive Werte stellen einen Anstieg und negative einen Abfall des Scores nach der Intervention dar.

	<i>ohne Neglect</i>					Neglect				
	Min	Max	M	Md	SD	Min	Max	M	Md	SD
Teilnehmer										
Alter	25	29	25,57	25	1,40	35	72	56,34	62	15,63
USEQ										
Score Q1-5	21	23	22,14	22	0,64	21	24	22,67	23	1,25
Score Q1-6	24	27	25,43	24	0,90	25	29	27	27	1,63
CSQ-VR										
Prä										
Nausea	2	5	2,43	2	1,05	2	3	2,34	2	0,47
Vestibular	2	2	2	2	0	2	4	3	3	0,82
Oculomotor	2	4	2,86	2	0,99	2	2	2	2	0
Prä-Score	6	11	7,29	6	1,75	7	8	7,34	7	0,47
Post										
Nausea	2	4	2,29	2	0,70	2	2	2	2	0
Vestibular	2	2	2	2	0	2	4	3,34	4	0,94
Oculomotor	2	7	4,71	5	1,67	2	3	2,34	2	0,47
Post-Score	6	12	9	9	2	7	8	7,67	8	0,47
Diff										
Nausea			-0,14	0	-0,35			-0,34	0	-0,47
Vestibular			0	0	0			0,34	1	0,13
Oculomotor			1,86	3	0,68			0,34	0	0,47
Diff-Score			1,71	3	0,25			0,34	1	0

Altersverteilung

Im Vergleich der Gruppen zeigt sich ein großer Altersunterschied zwischen den Teilnehmern. Die Teilnehmer ohne Neglect waren deutlich jünger (Max<30 und M<26) als mit Neglect (Max<73 und M<57) und zeigten in der Altersverteilung eine deutlich geringere Streuung (SD = 1,40). Die Gruppe ohne Neglect setzte sich aus vier Männern und drei Frauen zusammen. Die Teilnehmer mit Neglect bestand aus zwei Männer und einer Frau.

User Satisfaction Evaluation Questionnaire

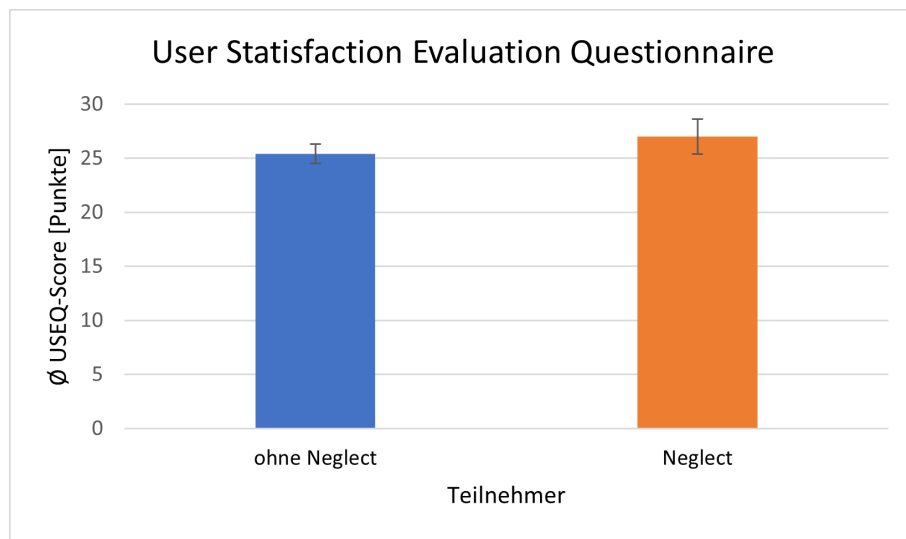


Abbildung 6.1: Zeigt den Mittelwert beider Gruppen für die Fragen eins bis sechs in Blau und Orange. Als Fehlerindikator wird die Standardabweichung (SD) angegeben.

Das Gesamtergebnis des USEQ (Score Q1-6) ergibt für beide Gruppen sehr hohe Werte ($M > 25$). Im Vergleich zeigt sich, dass die Teilnehmer mit Neglect die Usability höher bewerteten (Differenz: 1,57).

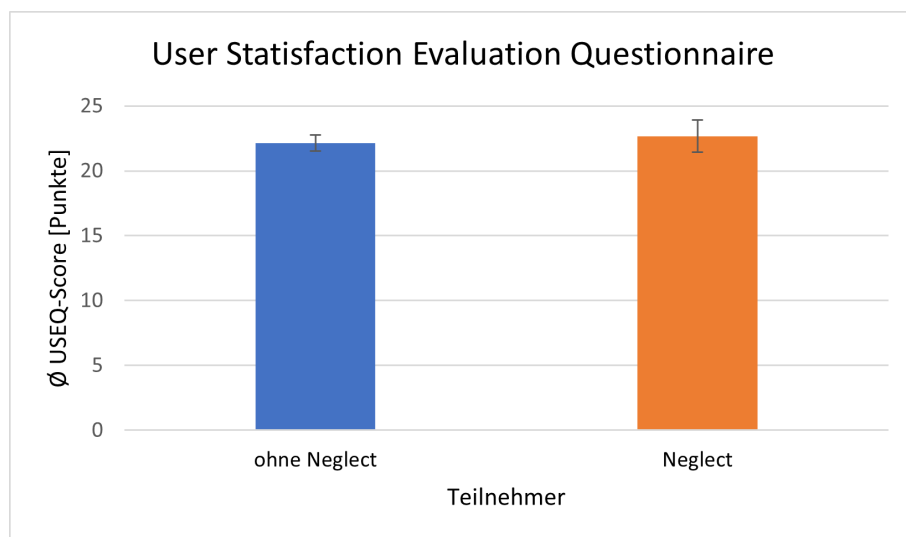


Abbildung 6.2: Zeigt den Mittelwert beider Gruppen für die Fragen eins bis fünf in Blau und Orange. Als Fehlerindikator wird die Standardabweichung (SD) angegeben.

Um die Ergebnisse der Usability besser miteinander vergleichen zu können wurden die Scores beider Gruppen für die Fragen 1-5 (Score Q1-5) gegenübergestellt, sodass sich der maximale Score von 30 (exzellente Usability) auf 25 reduzierte. Die USEQ Scores der

Teilnehmer ergaben sehr hohe Werte ($M > 22$) für die Usability, wobei die Werte bei den Teilnehmern mit Neglect unwesentlich höher sind. Für die separate Darstellung der Ergebnisse (Score Q1-5) ergibt sich für den Mittelwert beider Gruppen eine geringere Differenz (Differenz: 0,52).

Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire

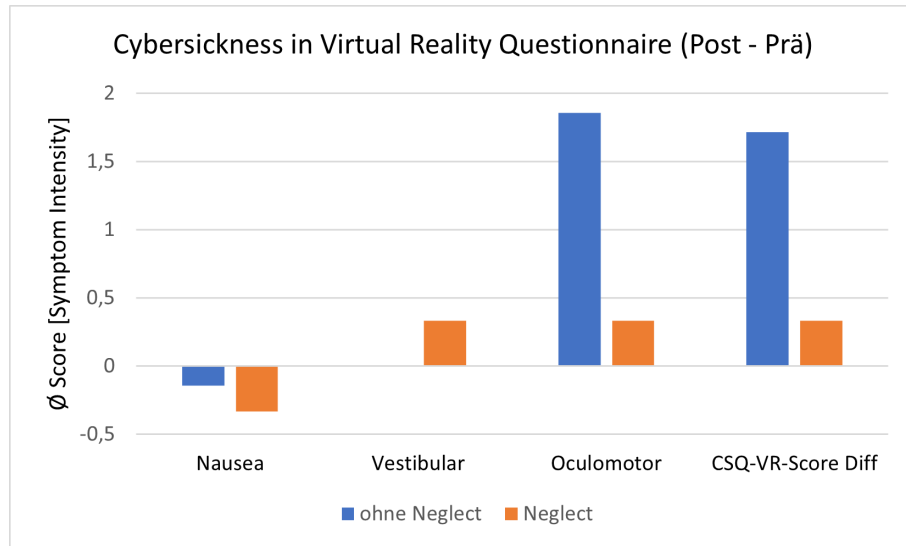


Abbildung 6.3: Stellt den Mittelwert als Differenz der Ergebnisse vor (Prä) und nach (Post) dem VR-Training für die kategorischen Ergebnisse und das Gesamtergebnis (CSQ-VR-Score Diff) dar.

Die Ergebnisse ($M < 8$) der Cybersickness (Symptomintensitäten) sind vor dem VR-Training als gering einzustufen und traten bei beiden Gruppen in vergleichbarer Höhe auf. In der Kategorie Nausea zeigt sich im Vergleich eine höhere Streuung ($SD = 1,05$), wobei das Ergebnis (Score = 5) einer Probandin vergleichsweise hoch ausfiel.

Das Gesamtergebnis (M) nach dem VR-Training zeigt einen Anstieg der CSQ-VR Scores beider Gruppen. Im Vergleich (Diff) zeigt sich, dass das Gesamtergebnis der Teilnehmer mit Neglect niedriger ausfällt. Während die Ergebnisse der Kategorie Nausea abnahmen, stieg die Kategorie Oculomotor beider Gruppen an. Die Kategorie Vestibular blieb bei den Teilnehmer ohne Neglect unverändert, während sie bei den Teilnehmern mit Neglect anstieg. Die Veränderung (Diff) der Werte und das Gesamtergebnis (M) wird als gering betrachtet.

6.2.3 Diskussion

In der Diskussion werden die Ergebnisse hinsichtlich der Forschungsfragen interpretiert, wobei mögliche Ursachen und Einflussfaktoren sowie damit einhergehende Schlussfolgerungen eingebracht werden. Des Weiteren wird die Einschätzung zur Funktionalität der VR-Trainingsanwendung sowie weiterer sinnvoller Verbesserungen und Erweiterungen dargelegt.

Feedback der Experten

Die Antworten der Experten zu den Fragen eins bis sechs (Tab. 6.1 - 6.3) zeigen einstimmig, dass der Bedarf für das neuartige VR-Training vorhanden ist und dass dieses viele Vorteile bietet. Weiterhin wurde angemerkt, dass die Umsetzung der VR-Trainingsanwendung gelungen ist und die Stärken in der Gestaltung der VU, dem Tutorial mit der Verwendung von Erklärvideos, dem ET-Interaktionskonzept mit der Objekthervorhebung und den verschiedenen Hilfestellungen gesehen werden. Als Folge wurde das VR-Training als gelungene Alternative zu den herkömmlichen therapeutischen Verfahren und als ein alltagsnahes und abwechslungsreiches Medium hervorgehoben, welches für ein Hometraining geeignet wäre.

Schwächen, Verbesserungsvorschläge und der Bedarf weiterer Merkmale wurde zu den Fragen sieben bis zehn (Tab. 6.3 - 6.4) angegeben. Die Antworten ergaben, dass sich vereinzelt eine deutlichere (dickere) Objekthervorhebung, eine neutrale Wandfarbe als Hintergrund, eine kürzere Zeitdauer für das Einblenden der Hilfestellung (Hilfstool 1, Kopfhaltedefeedback) und die Variation der Transportgeschwindigkeit gewünscht wurde. Weitere Anmerkungen zeigten den Zwiespalt zwischen einer zu sterilen, minimalistischen VU und der Verwendung zu vieler Gestaltungselemente. Hierbei wurden die verwendeten Wandbilder zum einen bereits als ablenkend und zum anderen als sinnvolle Orientierungspunkte empfunden. Eine Expertin machte den Vorschlag, eine realistischere Gestaltung durch zusätzliche Deko nur für höhere Trainingslevels zu implementieren, sodass die Objekte gleichzeitig als Ablenkungen dienen können. Ergänzend wurden Ablenkungsgeräusche, eine häufigere (je Transport) Darstellung der Trainingsperformance und das plötzliche Anzeigen kontraläsionaler Hinweise in der Pausenszene als sinnvolle Erweiterung betrachtet. Während das zweite Hilfstool bereits durch einen kontraläsionalen Hinweis das Suchtraining vereinfachte, war es für die Pausenszene das Ziel, die vorbeifliegenden Objekte passiv zu beobachten. Aus diesem Grund wird eine Implementierung weiterer Hinweise für die Pausenszene als nicht notwendig betrachtet. Des Weiteren wurde eine Funktionalität zur Auswahl des Trainings für Patienten mit der Vernachlässigung der rechten Gesichtsfeldseite (rechtsseitiger Neglect) vorgeschlagen. Weil der linksseitige Neglect mit einem Anteil von 90% [11] aller USN-Patienten häufiger Auftritt wurde für die VR-Trainingsanwendung eine spezifische

Objektbewegung von rechts nach links entwickelt. Um weiteren Patienten die Rehabilitation zur Verfügung stellen zu können, stellt die Implementierung einer Funktionalität zur optionalen Anpassung der Objektbewegungsrichtung und weiterer Features eine sinnvolle Erweiterung der VR-Trainingsanwendung dar. Weitere Verbesserungsvorschläge wurden im Entwicklungsprozess bereits umgesetzt und werden an dieser Stelle nicht wiederholt.

Studienergebnisse

Als Grundlage der weiteren Diskussion werden folgend Anmerkungen der Probanden zur Studie wiedergegeben.

- **P1:** Ich empfinde die Bestätigung des Ladekreises als unangenehm (visuell).
- **P2:** Ich empfand das Lesen des Textes ein wenig unangenehm.
- **P3:** Meine Augen sind schnell ausgetrocknet.
- **P4:** Ich nehme den Fliegengitter-Effekt stark wahr.
- **P5:** Die VR-Brille war auf Dauer unbequem.
- **P6:** Die Objekte sind links und rechts unscharf.
- **P7:** Die oberen Objekte werden nicht so scharf dargestellt.

Cybersickness

In Bezug auf die **Forschungsfrage 2** der Arbeit zeigen die Ergebnisse des CSQ-VR, dass bei der Verwendung der VR-Trainingsanwendung leichte Nebenwirkungen auftreten. Die Ursache für die geringe Höhe des Anstiegs wird mit der Minimierung begünstigender Cybersickness-Faktoren bzw. der Implementierung vorbeugender Features wie einem Szenenübergang in Verbindung gebracht. Das Auftreten der Cybersickness lässt sich womöglich mit der Aussage (**P1**) einer Probandin in Verbindung bringen. Obwohl der Hintergrund des Ladekreises undurchsichtig war, wurde die Bestätigung bzw. der Übergang von der Nah- zur Fernsicht als unangenehm wahrgenommen, wobei der Effekt bei keinen weiteren Teilnehmern auftrat. Eine andere Probandin (**P2**) empfand den Wechsel und das anschließende Lesen des Anleitungstextes in der Nahsicht (erstes Tutorial) als unangenehm, wobei die Person sich selber als anfällig für die Bewegungskrankheit und Cybersickness beschrieb. Ein weiterer Proband (**P3**) mit Kontaktlinsen äußerte, dass seine Augen durch das leuchtende Display besonders schnell austrockneten. Außerdem trat in der VR-Trainingsanwendung bei dem Szenenübergang zur Pausenszene für das Laden der neuen Szene eine kurzzeitige Verzögerung auf, wodurch das Bild im HMD stoppte und ein Ladebildschirm kurzzeitig zu sehen war. Dieser Effekt könnte einen Einflussfaktor für das Auftreten von Cybersickness dargestellt haben. Um diesen Effekt zu verhindern und die

Immersion aufrecht zu erhalten, besteht die Notwendig, die Pausenszene vorzuladen und den Szenenwechsel erst im Anschluss durchzuführen. Der Abfall der CSQ-VR Ergebnisse für die Kategorien Nausea (beide Gruppen) und Vestibular (ohne Neglect) könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Teilnehmer durch das VR-Training von ihren Symptomen abgelenkt wurden. Der geringe Anstieg der Symptomintensitäten bei Teilnehmern mit Neglect deutet darauf hin, dass das VR-Training gut verträglich ist. Des Weiteren werden die geringen Nebenwirkungen als eine gute Voraussetzung für die Rehabilitation mit der VR-Trainingsanwendung betrachtet.

Usability

Für die Usability erzielte die VR-Trainingsanwendung sehr hohe Ergebnisse. Neben dem Verbesserungspotenzial der Anwendung wie einer realistischeren Raumgestaltung (Feedback Experten) zur Steigerung der Immersion, wird die Ursache des Ergebnisses mit hardwarebedingten Nachteilen assoziiert. Ein Proband (**P4**) nahm den Fliegengitter-Effekt (*screen door effect*) mit dem Wahrnehmen der Bildpixel als Bildartefakt besonders stark wahr. Ein anderer Proband (**P5**) empfand den Sitz der VR-Brille auf Dauer unbequem, da ihm das Polster zu sehr auf die Nase drückte. Weiterhin äußerten mehrere Probanden (**P6** und **P7**) und eine Expertin (C3, Tab. 6.2) ihren Unmut über die vor allem unscharfe Darstellung der Fließbandobjekte am Rand des Sichtfeldes. Der Fliegengitter-Effekt [44] ist der geringen Nähe zum Display geschuldet. Obwohl der Effekt sich zwar technologisch durch eine sehr hohe Auflösung vermeiden ließe, bleibt die Herausforderung bestehen, ein erschwingliches HMD mit entsprechender Spezifikation zu entwickeln. Die Verwendung neuerer Hardware kann dennoch zur Verbesserung genannter Effekte führen. Ein HMD mit einer höheren Auflösung kann zu einem höheren Detailgrad und zur Reduktion des Fliegengitter-Effektes beitragen, sodass Objekte auch in einer gewissen Entfernung besser wahrgenommen werden können. Ein größeres FoV kann den Effekt reduzieren, dass vor allem Objekte am Ende des Fließbandes unscharf wahrgenommen werden. Die HTC Vive Pro 2 verfügt mit 2448×2448 Pixel pro Auge und einem horizontalen Sichtfeld von 120° über eine höhere Auflösung und ein 10° größeres Sichtfeld als das Vorgänger Modell.²⁷ Das HMD von Apple soll Medienberichten zufolge neben ET über eine Auflösung von 4K pro Auge (3.840×2.160 Pixel) verfügen.²⁸

27: VIVE Pro 2, <https://www.vive.com/de/product/vive-pro2-full-kit/specs/>

28: Apple HMD, <https://www.digitaltrends.com/computing/apple-reality-pro-headset-rumors-news-price-release-date/>

Gestaltung des VR-Trainingssystems

In der Studie waren alle Teilnehmer in der Lage, das Training eigenständig ohne zusätzliche Hilfestellung oder Erklärungen durchzuführen (**Forschungsfrage 2**). Dies zeigt, dass es gelungen ist, das Tutorial durch die Verwendung von Text, Sprache und interaktiven Aufgaben verständlich zu gestalten, wobei durch eine Expertin vor allem die Verwendung von Videos zur Darstellung der durchzuführenden Interaktionen hervorgehoben wurde (D7, Tab. 6.4).

In Bezug auf die **Forschungsfrage 1** der Arbeit wurde gezeigt, wie die therapeutischen Verfahren des visuellen Suchtrainings und der OKS sinnvoll in eine VR-Trainingsanwendung implementiert werden können. Angefangen mit der Konzeptionierung des VR-Trainingssystems und dem Aufzeigen prototypischer Entwicklungskonzepte wurde der Weg hin zum finalen VR-Trainingssystem aufgezeigt. Hierbei wurden Ideen, iterative Bewertungen, gewonnene Erkenntnisse und getroffene Entscheidungen wiedergegeben. Das VR-Trainingssystem bietet mit vier Tutorials zur Trainingseinweisung und sechs Trainingslevels eine umfangreiche Auswahl an Programmodi. Neben nützlichen Tools für den Therapeuten sind geeignete Hilfestellungen für den Patienten entwickelt worden. Die Studie hat gezeigt, dass das Zielobjekt durch die Teilnehmer mit Neglect ohne zusätzliche verbale Aufforderung lokalisiert werden konnte (A6, Tab. 6.3), sodass der visuelle Hinweis des 2. Hilfstools womöglich ausreichend ist.

Basierend auf dem Expertenfeedback besteht weiteres Verbesserungspotenzial für die VR-Trainingsanwendung, welches zu einem höheren Usability Ergebnis führen könnte. Durch den Hinweis der Experten wurde die Anzahl der Anleitungstexte des ersten Tutorials reduziert, sodass die Dauer der Einweisung verringert wurde. Das Wiederholen des Trainings durch den ersten Teilnehmer mit Neglect kann darauf hindeuten, dass die Trainingsdauer als Kombination des ersten Tutorial und dem Trainingslevel eins für Patienten mit stark ausgeprägten Neglect gerade zu Beginn zu viel Aufmerksamkeit benötigt. Indem die Anleitungstexte weiter reduziert bzw. gekürzt werden und die Videos durch Sprache ergänzt werden, ließe sich die Zeit der Trainingseinweisung reduzieren. Um jedoch sicherzustellen, dass die Trainingseinweisung verständlich bleibt und keine wichtigen Informationen ausgelassen werden, könnten alternativ das erste Tutorial und das Trainingslevel eins als separate TE durchführen. Während die Anforderungen aus dem Konzeptkapitel im Rahmen der Arbeit als erfüllt betrachtet werden, besteht weiteres Verbesserungspotenzial für die Darstellung der Trainingsperformance. Neben dem Vorschlag, die Performance nach jedem Transport anzuzeigen (E7, Tab. 6.4), wäre es patientengerechter, zeitbezogene Bewertungsparameter wie z. B. die Kopfrotationszeit in vereinfachter Form wie einer Punkteskala darzustellen. Außerdem ließe sich die Trainingsperformance optisch besser hervorheben und bereits in dem ersten Tutorial erklären.

7 Abschluss

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Darüber hinaus wird dem Leser ein Ausblick auf die zukünftige Forschung und weitere Entwicklungen gegeben.

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine VR-Trainingsanwendung zur Rehabilitation von Patienten mit einem visuellen Neglect (linksseitiger Neglect) entwickelt. Zu diesem Zweck war es das Ziel, das visuelle Suchtraining und die OKS in die VR zu implementieren. Für die Beantwortung der **Forschungsfrage 1** sollte aufgezeigt werden, wie ein entsprechendes VR-Trainingssystem gestaltet werden kann. Neben der Machbarkeit des Vorhabens sollte der iterative Entwicklungsprozess zur Entwicklung der VR-Trainingsanwendung wiedergegeben werden.

Als erstes wurden dem Leser die wichtigsten medizinischen und technischen Grundlagen zum Verständnis der Arbeit vermittelt. Mit der Konzeptionierung der VR-Trainingsanwendung wurde der anfängliche Entscheidungsprozess zur Gestaltung der virtuellen Umgebungen und Definition der Anforderungen wiedergegeben. Ein konzipiertes Trainingssystem teilte sich in das Trainings- und Pausenkonzept auf und beschrieb den Ablauf des Trainings in den beiden VU. Im Trainingskonzept wurde für die Implementierung eines visuellen Suchtrainings ein Beförderungsprinzip zum Transport von Objekten auf einem Fließband konzipiert. Die Auswahl von Schwierigkeitsparametern und einer Hervorhebungsart hatte darüber hinaus das Ziel, geeignete Trainingslevels zu implementieren. Ein Pausenkonzept fasste erste Anforderungen für die Umsetzung einer OKS für die Pausenszene zusammen. Um die zielgerichtete Koordination von Augen- und Kopfbewegungen im Training zu unterstützen war es zudem die Aufgabe geeignete Hilfstools zu entwickeln.

Fortführend wurde der iterative Entwicklungsprozess einschließlich entstandener Ideen, iterativer Bewertungen, getroffener Entscheidungen und gewonnen Erkenntnissen erläutert. Hierbei wurden mit dem klinischen Partner prototypische Programmversionen ausgetauscht, sodass sich optimalen Parametern für die Gestaltung des Trainings und des ersten Hilfstools angenähert wurde. Mit sechs Trainingslevels und vier Tutorials zur Trainingseinweisung entstand eine umfangreiche Programmauswahl. Das 1. Hilfstool bot dem Patienten eine

Hilfestellung, um zu lernen den Kopfes gerade zu Halten. Durch visuelles und akustisches Feedback wurde das Abweichen von einer neutralen Stellung signalisiert und ein gezieltes Zurückführen des Kopfes ermöglicht. Eine zweite Hilfestellung (2. Hilfstool) unterstützte das visuelle Suchtraining durch einen Hinweis auf der kontraläsionalen Seite. Hierbei sollte durch das grün blinkende Hervorheben des Zielobjektes oder Displaybuttons eine Beachtung des Objektes im kontraläsionalen Gesichtsfeld erreicht werden. Zuletzt wurde für die Trainingsauswertung eine Datenerfassung und für die Bedienung der Software eine Anwenderoberfläche implementiert. Durch die Umsetzung der Anforderungen konnte die Machbarkeit des Vorhabens bestätigt werden.

Gegen Ende des iterativen Entwicklungsprozesses wurde das VR-Trainingssystem von fünf Experten des UKL getestet und mit einem qualitativen Fragebogen evaluiert. Geäußerte Verbesserungsvorschläge flossen zum Großteil in den Entwicklungsprozess mit ein, während die Eignung der Software sowie Stärken und Schwächen Teil der Evaluation der Arbeit waren.

Für die weitere Bewertung wurde eine Studie mit sieben Teilnehmern ohne Neglect und drei Teilnehmern mit Neglect durchgeführt. Die Bewertung der Usability mit dem USEQ ergab für beide Gruppen sehr hohe Ergebnisse. Neben softwaretechnischen Verbesserungspotenzial wurden die Ergebnisse der Usability vor allem mit hardwarebedingte Nachteilen in Verbindung gebracht. Durch den Einsatz des CSQ-VR zur Erfassung von Cybersickness wurde gezeigt, dass bei der Verwendung der VR-Trainingsanwendung leichte Nebenwirkungen auftreten können (**Forschungsfrage 2**). Für beide Gruppen traten Symptome vor und nach dem VR-Training in vergleichbarer Höhe auf. Die Abnahme der kategorischen Scores (Nausea und Vestibular) wird darauf zurückgeführt, dass die Teilnehmer durch das VR-Training abgelenkt wurden. Der geringe Anstieg des CSQ-VR Scores deutet darauf hin, dass das VR-Training für Patienten mit einem visuellen Neglect gut verträglich ist. Das VR-Training der drei Patienten hat zudem gezeigt, dass die Teilnehmer in der Lage waren, das VR-Training eigenständig und ohne zusätzliche Hilfe durchzuführen.

7.2 Ausblick

Forschung. Während die Studienergebnisse aufgrund der geringen Patientenzahl bisher als Indikator interpretiert werden konnten, wird für aussagekräftigere Ergebnisse in Zukunft eine Studie mit einer größeren Teilnehmeranzahl benötigt. Hierbei können Ergebnisse der Arbeit verifiziert und die Wirksamkeit der VR-Trainingsanwendung evaluiert werden. Während im Rahmen dieser Arbeit bisher ein erstes VR-Training mit drei Patienten durchgeführt wurde, wird das Fortsetzen der Studie im UKL weitere Erkenntnisse hinsichtlich einer kognitiven Verbesserung des Neglects hervorbringen. Hierbei kann durch

die Auswertung der ET- und Kopfrotationsdaten Aufschluss darüber gegeben werden, inwieweit es erlernt wurde den Kopf eigenständig gerade zu halten. Sollte für die VR-Trainingsanwendung die Wirksamkeit der Rehabilitation bestätigt werden, ließe sich das VR-Training durch weitere Entwicklungen verbessern.

Individuelle Patiententherapie. Um das VR-Trainings noch abwechslungsreicher zu gestalten, könnten durch das Einbringen zusätzlicher Schwierigkeitsparameter weitere Trainingslevels entwickelt werden. Darüber hinaus ließe sich ein erster Ansatz für eine individuelle Patiententherapie entwickeln, sodass der Schwierigkeitsgrad des Trainings an die Fähigkeiten des Patienten angepasst wird. Hierbei könnte der Therapeut die Schwierigkeitsparameter über die Anwenderoberfläche individuell anpassen und zum Transport der Objekte geeignete Fließbandabschnitte bzw. Szenarios auswählen.

Hometraining. Auch die Weiterentwicklung zu einer Hometraining-Anwendung könnte für Patienten einen hohen Mehrwert darstellen. Hierbei könnte der Therapeut eine geeignete Trainingsfrequenz und einen ansteigenden Schwierigkeitsgrad in Form von Trainingslevels vorgeben. Durch den Abgleich von Trainingsdaten, wie der Trainingsperformance, könnte der Therapeut die Behandlung bei Bedarf anpassen. Von Vorteil wären weiterhin ein geringerer Personalaufwand und ein therapeutisches Angebot für ländliche Regionen mit einer schlechten medizinischen Versorgung.

Gamification. Die Abwechslung und Trainingsmotivation könnte durch die Implementierung weiterer Belohnungseffekte gesteigert werden. Ein weiterer Anreiz könnte eine patientengerechtere und ansprechendere Darstellung der Trainingsperformance sein. Um die eigene Trainingsperformance besser einschätzen zu können, wäre es zudem von Vorteil, die aktuelle Trainingsperformance in Relationen zu früheren Leistungen zu visualisieren. Ein weiterer Motivationsfaktor könnte durch ein Ranking zwischen Patienten erzielt werden. Hierbei ließen sich die Gesamtdauer des VR-Trainings und die Trainingsperformance in Form von Punkten visualisieren. Zuletzt könnte der optionale Austausch von Erfahrungen zwischen Patienten in Form von Text oder Video einen Mehrwert darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] COIFFET, P. AND BURDEA, G.C.: *Virtual Reality Technology*. 2. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003
- [2] NGUYEN, Minh-Tu ; NGUYEN, Hai-Khanh ; VO-LAM, Khanh-Duy ; NGUYEN, Xuan-Gieng ; TRAN, Minh-Triet: Applying virtual reality in city planning. In: *Virtual, Augmented and Mixed Reality: 8th International Conference, VAMR 2016, Held as Part of HCI International 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016. Proceedings 8* Springer, 2016, S. 724–735
- [3] In: BERNHAGEN, MAX; KAISER, ANDRÉ; JÜNEMANN, MARCUS; RZEPUS, JONAS; ET AL.: *Mitarbeiterzentriertes Gestalten und Unterstützen menschlicher Arbeit in der Montage mittels virtueller Technologien*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 279–314
- [4] MEDEIROS, Marina L. ; SCHLAGER, Bettina ; KRÖSL, Katharina ; FUHRMANN, Anton: The Potential of VR-based Tactical Resource Planning on Spatial Data. In: *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2022, S. 176–185
- [5] HEDRICK, Emily ; HARPER, Michael ; OLIVER, Eric ; HATCH, Daniel: Teaching & Learning in Virtual Reality: Metaverse Classroom Exploration. In: *2022 Intermountain Engineering, Technology and Computing (IETC)*, 2022, S. 1–5
- [6] CROSS, Jamie I. ; BOAG-HODGSON, Christine ; RYLEY, Timothy J. ; MAVIN, Timothy J. ; POTTER, Leigh E.: Using Extended Reality in Flight Simulators: A Literature Review. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* PP (2022)
- [7] BLUMSTEIN, GIDEON ; HARVARD BUSINESS REVIEW (Hrsg.): *Research: How Virtual Reality Can Help Train Surgeons*. <https://hbr.org/2019/10/research-how-virtual-reality-can-help-train-surgeons>, Abruf: 16.10.2019
- [8] CHHEANG, P.; Preim B.; Hansen C.; et a. V.; Saalfeld S. V.; Saalfeld: Collaborative Virtual Reality for Laparoscopic Liver Surgery Training. In: *2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, 2019, S. 1–17

- [9] BURDEA, Grigore: Keynote address: Virtual rehabilitation-benefits and challenges. In: *1st International Workshop on Virtual Reality Rehabilitation (Mental Health, Neurological, Physical, Vocational) VRMHR* Bd. 2002 sn, 2002
- [10] FROMMELT, P. ; LÖSSLEIN, H.: *NeuroRehabilitation: Ein Praxisbuch für interdisziplinäre Teams*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 9783642129155
- [11] GAMMERI, R.; IACONO, C.; RICCI, R.; SALATINO, A.: *Unilateral Spatial Neglect After Stroke: Current Insights*, Neuropsychiatr Dis Treat, Diss., 2020
- [12] CAVEDONI, P.; Mancuso V.; Bruni F.; Pedroli E. S.; Cipresso C. S.; Cipresso: Virtual reality for the assessment and rehabilitation of neglect: where are we now? A 6-year review update. In: *Virtual Reality* (2022). <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00648-0>
- [13] PEDROLI, Elisa ; SERINO, Silvia ; CIPRESSO, Pietro ; PALLAVICINI, Federica ; RIVA, Giuseppe: Assessment and rehabilitation of neglect using virtual reality: a systematic review. In: *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 9 (2015). <http://dx.doi.org/10.3389/fnbeh.2015.00226>. – DOI 10.3389/fnbeh.2015.00226
- [14] ZARGARI MARANDI, Ramtin ; GAZERANI, Parisa: Aging and eye tracking: In the quest for objective biomarkers. In: *Future Neurology* 14 (2019), 10, S. FN133. <http://dx.doi.org/10.2217/fnl-2019-0012>. – DOI 10.2217/fnl-2019-0012
- [15] HOLMQVIST, Kenneth ; NYSTRÖM, Marcus ; ANDERSSON, Richard ; DEWHURST, Richard ; JARODZKA, Halszka ; WEIJER, Joost Van d.: *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. OUP Oxford, 2011
- [16] DÖRNER, R. ; BROLL, W. ; GRIMM, P. ; JUNG, B.: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer Berlin Heidelberg, 2019
- [17] KARNATH, HANS-OTTO; HARTJE, WOLFGANG; WOLFRAM, ZIEGLER: *Kognitive Neurologie*. Thieme, 2006
- [18] FRUHMANN BERGER, Monika ; JOHANNSEN, Leif ; KARNATH, Hans-Otto: Time course of eye and head deviation in spatial neglect. In: *Neuropsychology* 22 (2008), Nr. 6, S. 697
- [19] KARNATH, Hans-Otto ; RORDEN, Christopher: The anatomy of spatial neglect. In: *Neuropsychologia* 50 (2012), Nr. 6, S. 1010–1017. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.06.027>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.06.027>. – ISSN 0028–3932. – Special Issue: Spatial Neglect and Attention

- [20] TING, Darren S. ; POLLOCK, Alex ; DUTTON, Gordon N. ; DOUBAL, Fergus N. ; TING, Daniel S. ; THOMPSON, Michelle ; DHILLON, Baljean: Visual Neglect Following Stroke: Current Concepts and Future Focus. In: *Survey of Ophthalmology* 56 (2011), Nr. 2, S. 114–134. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.survophtha.2010.08.001>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2010.08.001>. – ISSN 0039–6257
- [21] WAGNER, Sebastian ; BELGER, Julia ; JOERES, Fabian ; THÖNE-OTTO, Angelika ; HANSEN, Christian ; PREIM, Bernhard ; SAALFELD, Patrick: iVRoad: Immersive virtual road crossing as an assessment tool for unilateral spatial neglect. In: *Computers & Graphics* 99 (2021), S. 70–82. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.06.013>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.06.013>. – ISSN 0097–8493
- [22] KORTTE, Kathleen ; HILLIS, Argye: Recent Advances in the Understanding of Neglect and Anosognosia Following Right Hemisphere Stroke. In: *Current neurology and neuroscience reports* 9 (2009), 11, S. 459–65. <http://dx.doi.org/10.1007/s11910-009-0068-8>. – DOI 10.1007/s11910-009-0068-8
- [23] TING, Darren S. ; POLLOCK, Alex ; DUTTON, Gordon N. ; DOUBAL, Fergus N. ; TING, Daniel S. ; THOMPSON, Michelle ; DHILLON, Baljean: Visual Neglect Following Stroke: Current Concepts and Future Focus. In: *Survey of Ophthalmology* 56 (2011), Nr. 2, 114–134. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039625710001505>. – ISSN 0039–6257
- [24] FACCHIN, Alessio ; FIGLIANO, Giusi ; DAINI, Roberta: Prism Adaptation and Optokinetic Stimulation Comparison in the Rehabilitation of Unilateral Spatial Neglect. In: *Brain Sciences* 11 (2021), Nov, Nr. 11, 1488. <http://dx.doi.org/10.3390/brainsci11111488>. – DOI 10.3390/brainsci11111488. – ISSN 2076–3425
- [25] THÖMKE, F.: *Augenbewegungsstörungen: Ein klinischer Leitfaden für Neurologen*. Thieme, 2008. – ISBN 9783131593122
- [26] ORSOLITS, Horst ; LACKNER, Maximilian: *Virtual Reality und Augmented Reality in der Digitalen Produktion*. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-29009-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-29009-2>. – ISBN 978–3–658–29008–5
- [27] BURDEA, G.C. ; COIFFET, P.: *Virtual Reality Technology*. Wiley, 2003 (IEEE Press). – ISBN 9780471360896
- [28] SAALFELD, Patrick ; BÖTTCHER, Claudia ; KLINK, Fabian ; PREIM, Bernhard: VR System for the Restoration of Broken Cultural Artifacts on the Example of a Funerary

- Monument. In: *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2021, S. 739–748
- [29] BOLETIS, Costas ; CHASANIDOU, Dimitra: A Typology of Virtual Reality Locomotion Techniques. In: *Multimodal Technologies and Interaction* 6 (2022), Aug, Nr. 9, 72. <http://dx.doi.org/10.3390/mti6090072>. – DOI 10.3390/mti6090072. – ISSN 2414–4088
- [30] KIM, Yoon S. ; WON, JuHye ; JANG, Seong-Wook ; KO, Junho: Effects of Cybersickness Caused by Head-Mounted Display-Based Virtual Reality on Physiological Responses: Cross-sectional Study. In: *JMIR Serious Games* 2022 10(4):e37938 (2022). <http://dx.doi.org/10.2196/37938>. – DOI 10.2196/37938
- [31] KENNEDY, Robert S. ; LANE, Norman E. ; BERBAUM, Kevin S. ; LILIENTHAL, Michael G.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 3 (1993), Nr. 3, S. 203–220. http://dx.doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3. – DOI 10.1207/s15327108ijap0303_3
- [32] KOURTESIS, Panagiotis ; LINNELL, Josie ; AMIR, Rayaana ; ARGELAGUET, Ferran ; MACPHERSON, Sarah: *Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire (CSQ-VR): A Validation and Comparison against SSQ and VRSQ*
- [33] DUCHOWSKI, A.T.: *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer International Publishing, 2017. – ISBN 9783319578811
- [34] IMAOKA, Yu ; FLURY, Andri ; BRUIN, Eling de: Assessing Saccadic Eye Movements With Head-Mounted Display Virtual Reality Technology. In: *Frontiers in Psychiatry* 11 (2020), 09, S. 572938. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsy.2020.572938>. – DOI 10.3389/fpsy.2020.572938
- [35] KIM, YM.; CHUN, MH.; YUN, GJ.; SONG, YJ.; YOUNG, HE.: *The effect of virtual reality training on unilateral spatial neglect in stroke patients*, Ann Rehabil Med, Diss., 2011
- [36] FORDELL, K.; Eklund A.; Malm J. H.; Bodin B. H.; Bodin: RehAtt – scanning training for neglect enhanced by multi-sensory stimulation in Virtual Reality. In: *Topics in Stroke Rehabilitation* 23 (2016), Nr. 3, 191-199. <http://dx.doi.org/10.1080/10749357.2016.1138670>. – DOI 10.1080/10749357.2016.1138670. – PMID: 27077985
- [37] YASUDA, Kazuhiro ; MUROI, Daisuke ; OHIRA, Masahiro ; IWATA, Hiroyasu: Validation of an immersive virtual reality system for training near and far space neglect in individuals with stroke: A pilot study. In: *Topics in Stroke Rehabilitation* 24 (2017),

- 07, S. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1080/10749357.2017.1351069>. – DOI 10.1080/10749357.2017.1351069
- [38] COGNÉ, E.; Guillot L.; Klinger E.; Glize B.; Jacquin-Courtois S.; Cazalets J.-R.; Joseph P.-A. M.; G. M.; Guillaud: Association between prism adaptation and auditory cues on spatial navigation in individuals with unilateral neglect. In: *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 63 (2020), Nr. 1, 12-20. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.03.005>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.03.005>. – ISSN 1877–0657
- [39] CHATTERJEE, Kausik ; BUCHANAN, Alastair ; COTTRELL, Katy ; HUGHES, Sara ; DAY, Thomas ; JOHN, Nigel: Immersive Virtual Reality for the Cognitive Rehabilitation of Stroke Survivors. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* PP (2022), 03, S. 1–1. <http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3158731>. – DOI 10.1109/TNSRE.2022.3158731
- [40] CAVEDONI, Silvia ; CIPRESSO, Pietro ; MANCUSO, Valentina ; BRUNI, F. ; PEDROLI, Elisa: Virtual reality for the assessment and rehabilitation of neglect: where are we now? A 6-year review update. In: *Virtual Reality* 26 (2022), 05. <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-022-00648-0>. – DOI 10.1007/s10055-022-00648-0
- [41] TROMP, Johanne ; KLOTZSCHE, Felix ; KROHN, Stephan ; AKBAL, Mert ; POHL, Leonardo ; QUINQUE, Eva M. ; BELGER, Julia ; VILLRINGER, Arno ; GAEBLER, Michael: OpenVirtualObjects: An Open Set of Standardized and Validated 3D Household Objects for Virtual Reality-Based Research, Assessment, and Therapy. In: *Frontiers in Virtual Reality* 1 (2020). <http://dx.doi.org/10.3389/frvir.2020.611091>. – DOI 10.3389/frvir.2020.611091
- [42] BROWN, Phillip ; POWELL, Wendy: Pre-Exposure Cybersickness Assessment Within a Chronic Pain Population in Virtual Reality. In: *Frontiers in Virtual Reality* 2 (2021). <http://dx.doi.org/10.3389/frvir.2021.672245>. – DOI 10.3389/frvir.2021.672245. – ISSN 2673–4192
- [43] GIL-GOMEZ, Jose-Antonio ; MANZANO-HERNÁNDEZ, Pilar ; ALBIOL, Sergio ; AULA-VALERO, Carmen ; GIL-GÓMEZ, Hermenegildo ; LOZANO-QUILIS, J.A.: USEQ: A Short Questionnaire for Satisfaction Evaluation of Virtual Rehabilitation Systems. In: *Sensors* 17 (2017), 07. <http://dx.doi.org/10.3390/s17071589>. – DOI 10.3390/s17071589
- [44] ZHAN, Tao ; YIN, Kun ; XIONG, Jianghao ; HE, Ziqian ; WU, Shin-Tson: Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Perspectives and Challenges. In: *iScience* 23 (2020), Nr. 8, S. 101397. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101397>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101397>. – ISSN 2589–0042

A Anhang

Follow-up-Befragung

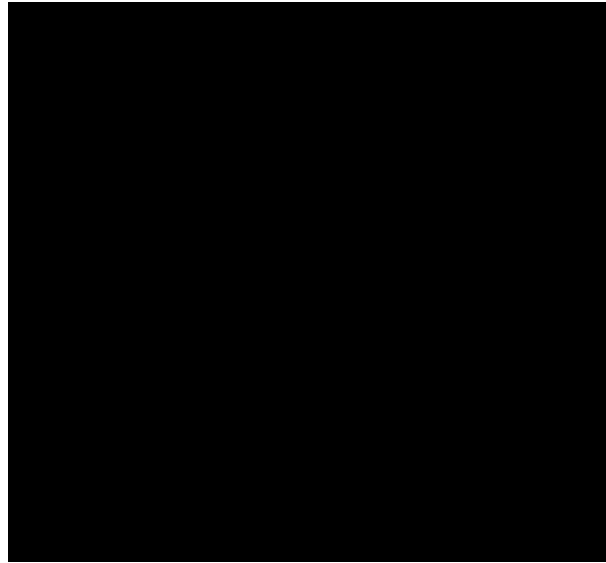


Abbildung A.1: Follow-up-Befragung: Lebensumstände von Schlaganfallpatienten sechs Monate nach dem Akutereignis [10]

Eine Follow-up-Befragung von acht Kliniken für Schlaganfall in Hessen zeigt die Lebensumstände von Schlaganfallpatienten nach stationärer Rehabilitation sechs Monate nach dem Akutereignis. Während ungefähr zwei Drittel der Teilnehmer keine Hilfe benötigen, ist ungefähr ein Drittel auf Hilfe angewiesen und fünf % auf ein Leben im Pflegeheim angewiesen [10].

Raumanordnung der Basisstationen

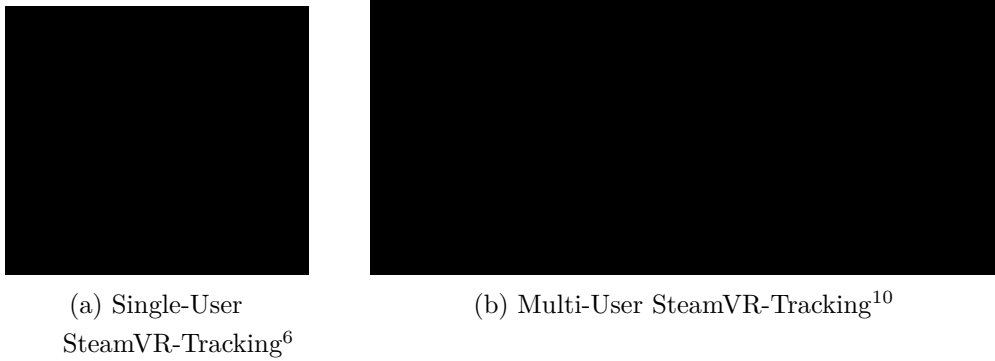


Abbildung A.2: Raumanordnung der Basisstationen für das SteamVR-Tracking der HTC Vive Pro Eye in der Single und Multi-User Variante^{1.A}

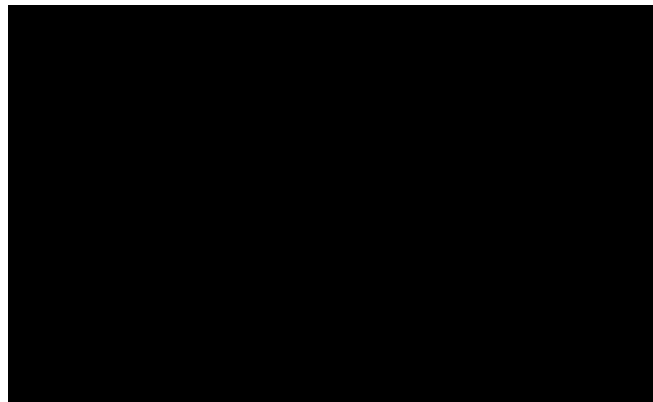
Die Basisstationen der Version 2.0 besitzen ein 150° horizontales und 110° vertikales FoV. Zum Tracking eines Raumes werden mindestens zwei gegenüberliegende Basisstationen benötigt, die eine Raumgröße von maximal zehn m x zehn m abdecken können.^{1.A}

1.A: https://developer.vive.com/documents/718/VIVE_Pro_Eye_user_guide.pdf

Tobii Gaze-2-Object-Mapping (G2OM)



(a) Problematik des ET-Selektionsverfahrens

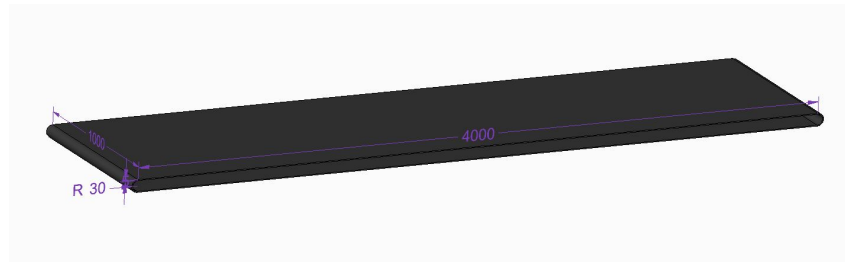


(b) Vergleich des G2OM zum Stadard Raycast-Verfahren

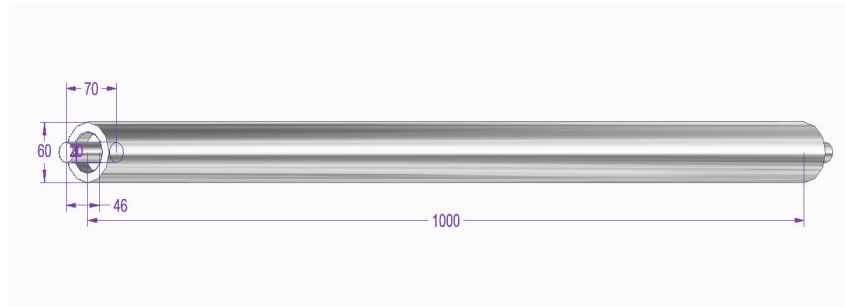
Abbildung A.3: Das G2OM basiert auf einem Machine Learning Algorithmus und verspricht im Vergleich zum Standard Raycast-Verfahren eine robustere ET-Selektionsmethode (b). Tobii AB visualisiert die Problematik der ET-Selektion. Obwohl der Nutzer auf das Objekt schaut, kommt es durch Faktoren zu einer Abweichung des Blickstrahles (a). Während die originale Kollidergröße (Objektgröße) keine und die doppelte Kollidergröße zu viele Kollisionen erkennt, zeigt das G2OM die besten Ergebnisse.^{2.A}

2.A: Tobii G2OM, <https://developer.tobii.com/xr/solutions/tobii-g2om/>

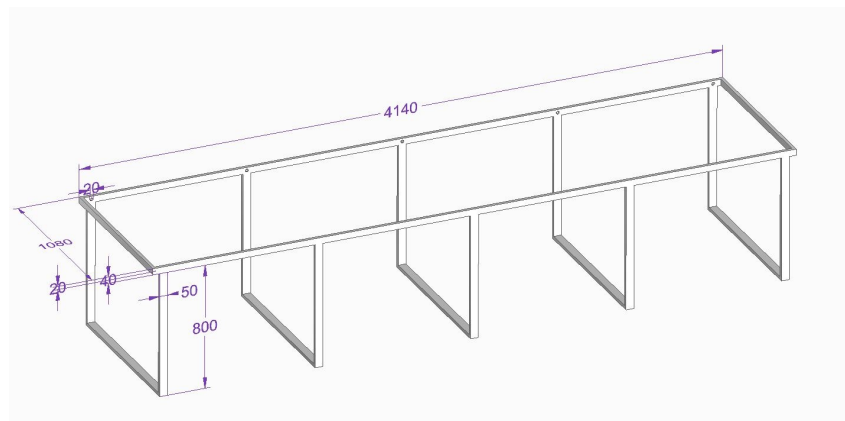
Bauteile der Fließbandgeometrie



(a) Band



(b) Stift mit Bohrung und Fortsatz



(c) Tischgestell

Abbildung A.4: Die grundlegende Fließbandgeometrie setzte sich aus drei modellierten Bauteilen zusammen. Dargestellt sind das Band a (Breite 1000mm und Länge 4000mm), der Stift b (Länge 1000mm, ohne Fortsatz) und das Tischgestell c (Breite 1080mm und Länge 4000mm) mit der Bemaßung in Millimetern.

Fragebögen

Im Folgenden wird der entwickelte qualitative Fragebogen zur Erfassung der Expertenmeinungen dargestellt. Darauffolgend ist die Übersetzung des CSQ-VR und USEQ ins Deutsche dargestellt.

Fragebogen zur Evaluierung von Virtual Reality in der kognitiven Rehabilitation von Neglect

Beschreibung:

Dieser Fragebogen dient dazu, die Meinungen von ExpertInnen zur Qualität der entwickelten VR-Anwendung mit optokinetischer Stimulation (OKS) und visuellem Suchtraining bei visuellem Neglect zu erfassen. In einer zukünftigen Trainingsstudie wird untersucht, inwieweit die gewünschten Effekte der Behandlung sichtbar werden und welche Nutzerfreundlichkeit das Programm hat.

Datum: _____

Beruf: _____

Geschlecht: _____

Alter: _____

1. Wie geeignet finden Sie die VR-Trainingssoftware als zusätzliche Unterstützung für die Behandlung?

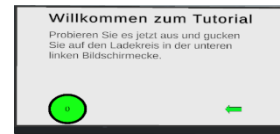
2. Ich empfinde die folgenden Merkmale als Stärken.

3. Ich empfinde die folgenden Merkmale als Schwächen.

Abbildung A.5: Expertenfragebogen - Seite 1/3

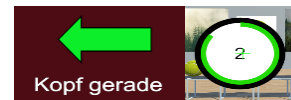
4. Wie beurteilen Sie den Nutzen der ersten Hilfestellung, um die Suche nach dem Eyetracking-Displaybutton zu erleichtern?

Beschreibung: Mithilfe des ET-Displaybuttons bestätigt der Patient*in den angezeigten Text in der Demo. Wird der Button nicht innerhalb von 5s anguckt, wird dieser blinkend hervorgehoben und ein Pfeil weist den Weg zum Button.



5. Wie beurteilen Sie den Nutzen der zweiten Hilfestellung, um den Kopf gerade zu halten?

Beschreibung: Sobald der Patient*in den Kopf dreht, wird das Sichtfeld rot abgedunkelt. Wird der Kopf im Anschluss nicht innerhalb von 10 s zurück in den neutralen Bereich gedreht, erscheint ein Richtungspfeil. Zur Bestätigung wird der Kopf gerade gehalten, indem das Kreuz (Sichtfeldmittelpunkt) für 3 s in den Ladekreis gehalten wird.



6. Wie beurteilen Sie den Nutzen der dritten Hilfestellung, um die Suche nach dem Zielobjekt zu erleichtern?

Beschreibung: Nachdem die Objekte vor dem Ausgang stehen geblieben sind, hat der Patient die Aufgabe, das Zielobjekt (1. Objekt) zur Bestätigung für 3 s anzuschauen. Wird das Zielobjekt nicht innerhalb von 15 s angesehen, wird es blinkend hervorgehoben.



7. Welche weiteren Hilfestellungen halten Sie ggf. für sinnvoll?



8. Wie geeignet finden Sie die beiden VR-Umgebungen (Trainings- und Pausenszene)?



9. Welche weiteren Merkmale der VR-Umgebung betrachten Sie ggf. als sinnvoll?



10. Ich denke, dass die folgenden Aspekte in der VR-Trainingssoftware fehlen und dass ihre Implementierung einen zusätzlichen Nutzen bringen würde.



Abbildung A.7: Expertenfrageboen - Seite 3/3

Prä-Fragebogen zur Bewertung von Virtual Reality induzierten Symptomen und Effekten

Patient/In-ID:

Session/Trainings-Nr.:

Alter:

Datum:

Testleiter/In:

Seite 1 von 2

Im Folgenden befinden sich Fragen zu Ihrem Befinden. Bitte geben Sie an, wie Sie sich **aktuell** fühlen. Bitte kreuzen Sie die Antwort an, die am ehesten auf Sie zutrifft (von 1 bis 7).

Empfinden Sie aktuell:

1. Übelkeit? (z.B. Magenschmerzen, Sodbrennen / Brechreiz?)

1	2	3	4	5	6	7
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht vorhanden	sehr leicht	leicht	etwas	stark	sehr stark	extrem

Falls Sie zusätzliche Anmerkungen haben, ergänzen Sie diese bitte hier:

2. Schwindel? (z.B. Benommenheit / Schwindelgefühl?)

1	2	3	4	5	6	7
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht vorhanden	sehr leicht	leicht	etwas	stark	sehr stark	extrem

Falls Sie zusätzliche Anmerkungen haben, ergänzen Sie diese bitte hier:

3. Fühlen Sie sich desorientiert? (z.B. Orientierungsschwankungen / Gleichgewichtsstörungen?)

1	2	3	4	5	6	7
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht vorhanden	sehr leicht	leicht	etwas	stark	sehr stark	extrem

Falls Sie zusätzliche Anmerkungen haben, ergänzen Sie diese bitte hier:

Abbildung A.8: Prä-Fragebogen zur Bewertung von Virtual Reality induzierten Symptomen und Effekten - Seite 1/2

Prä-Fragebogen zur Bewertung von Virtual Reality induzierten Symptomen und Effekten

Patient/In-ID:

Session/Trainings-Nr.:

Testleiter/In:

Datum:

Seite 2 von 2

Empfinden Sie aktuell:

4. Gleichgewichtsprobleme? (z.B. Schwierigkeiten beim Stehen / instabile Körperhaltung?)

1	2	3	4	5	6	7
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht vorhanden	sehr leicht	leicht	etwas	stark	sehr stark	extrem

Falls Sie zusätzliche Anmerkungen haben, ergänzen Sie diese bitte hier:

5. Visuelle Erschöpfung? (z.B. Müdigkeit oder Schläfrigkeit)

1	2	3	4	5	6	7
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht vorhanden	sehr leicht	leicht	etwas	stark	sehr stark	extrem

Falls Sie zusätzliche Anmerkungen haben, ergänzen Sie diese bitte hier:

6. Visuelles Unwohlsein? (z.B. Augenschmerzen, verschwommene Sicht oder Kopfschmerzen)

1	2	3	4	5	6	7
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
nicht vorhanden	sehr leicht	leicht	etwas	stark	sehr stark	extrem

Falls Sie zusätzliche Anmerkungen haben, ergänzen Sie diese bitte hier:

Abbildung A.9: Prä-Fragebogen zur Bewertung von Virtual Reality induzierten Symptomen und Effekten - Seite 2/2

Fragebogen zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von virtuellen Rehabilitationssystemen

Studien-ID:

Teilnehmerbefragung nach Testung, Patient/-In

Seite 1 von 1

Gebrauchstauglichkeit:

Mir hat die Nutzung des Systems gefallen.				
●	●	●	●	●
Stimme gar nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/teils	Stimme zu	Stimme sehr zu
Ich habe das System erfolgreich verwendet.				
●	●	●	●	●
Stimme gar nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/teils	Stimme zu	Stimme sehr zu
Ich war in der Lage das System zu kontrollieren.				
●	●	●	●	●
Stimme gar nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/teils	Stimme zu	Stimme sehr zu
Die vom System gelieferten Informationen waren verständlich.				
●	●	●	●	●
Stimme gar nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/teils	Stimme zu	Stimme sehr zu
Ich habe mich bei der Benutzung des Systems unwohl gefühlt.				
●	●	●	●	●
Stimme gar nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/teils	Stimme zu	Stimme sehr zu
Ich denke, dass das System für meine Rehabilitation hilfreich sein wird.				
●	●	●	●	●
Stimme gar nicht zu	Stimme nicht zu	Teils/teils	Stimme zu	Stimme sehr zu

Übersetzung des User Satisfaction Evaluation Questionnaire (USEQ) ins Deutsche.
Der USEQ wurde von Gil-Gómez et al. entwickelt.

Abbildung A.10: Fragebogen zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von virtuellen Rehabilitationssystemen

Studie Virtuelle Realität

Studien-ID:

Teilnehmerbefragung nach Testung, Patient/-In

Seite 1 von 1

User Satisfaction Evaluation Questionnaire (USEQ)

Question	Response
	Not at All-Very Much
Q1. Did you enjoy your experience with the system?	1 2 3 4 5
Q2. Were you successful using the system?	1 2 3 4 5
Q3. Were you able to control the system?	1 2 3 4 5
Q4. Is the information provided by the system clear?	1 2 3 4 5
Q5. Did you feel discomfort during your experience with the system?	1 2 3 4 5
Q6. Do you think that this system will be helpful for your rehabilitation?	1 2 3 4 5

Abbildung A.11: User Satisfaction Evaluation Questionnaire [43]