

Untersuchung des Nutzens haptischer Technologie zur Unterstützung von Virtual Reality Psychotherapie

-Dissertation-
zur Erlangung des Doktorgrades Dr. rer. nat.

vorgelegt von
Vanessa Schmücker M.Sc

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Rainer Brück
Zweitprüfer: Prof. Dr. Tim Klucken, Dipl.-Psych.

Universität Siegen
Lebenswissenschaftliche Fakultät
Lehrstuhl Medizinische Informatik

Datum der Einreichung: 31.08.2023

Datum der Prüfung: 17.11.2023

Vorwort

Die vorliegende Dissertation widmet sich dem Thema der Einbindung haptischer Technologien in psychotherapeutische Virtual Reality (VR) Anwendungen. In einer Zeit, in der die Welt von einer beispiellosen globalen Krise, der Covid-19-Pandemie, erschüttert wurde, hat sich das Potenzial von virtuellen Realitäten als mögliches Instrument zur Bewältigung der damit einhergehenden Herausforderungen gezeigt.

Die Pandemie zwang die Menschheit zu physischer Distanzierung und sozialer Isolation, wodurch das Bedürfnis nach innovativen Lösungen zur Aufrechterhaltung der zwischenmenschlichen Interaktion und der psychotherapeutischen Versorgung in den Vordergrund rückte. In diesem Zusammenhang kam die Idee auf, haptische Technologien zu nutzen, um eine immersive Umgebung zu schaffen, die nicht nur visuelle und akustische Reize, sondern auch taktile Empfindungen bereitstellt.

Diese Dissertation befasst sich mit verschiedenen Aspekten der haptischen Technologien zur Einbindung in psychotherapeutische Virtual Reality Anwendungen. Sie setzt sich nicht nur mit den technologischen Entwicklungen und Fortschritten auseinander, sondern auch mit dem Potenzial für den VR-Therapiebereich und dem Nutzen im Praxisalltag, damit Menschen mit unterschiedlichen psychischen Erkrankungen unterstützt werden und ihnen eine effektive und zugängliche Behandlungsmethode geboten wird.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Rainer Brück, der mich mit seinen Ratschlägen und Inspirationen während des gesamten Prozesses begleitet hat. Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr. Tim Klucken für die psychologische Expertise und die spannenden Kooperationen, die mich in dieser Zeit begleitet haben.

Zudem möchte ich meine Dankbarkeit gegenüber meiner Familie und meinen Freunden zum Ausdruck bringen. Ihr unermüdlicher Rückhalt, ihre ermutigenden Worte und ihr Verständnis haben mich während der gesamten Erstellung dieser Dissertation begleitet. Ihre Unterstützung hat mir die nötige Motivation und Stärke gegeben, um dieses komplexe Projekt erfolgreich abzuschließen.

Meinen Geschwistern Bianca, Felix und Annika, sowie Kai, Leni und Bernhard gebührt mein aufrichtiger Dank für ihre ermutigenden Worte, ihr Verständnis und ihre Bereitschaft, mir bei jeder Gelegenheit zur Seite zu stehen. Ihre stetige Unterstützung hat mir gezeigt, dass ich auf eine wunderbare Familie zählen kann, die mich bedingungslos unterstützt und die für mich da ist.

Des Weiteren möchte ich mich bei all meinen Freunden bedanken. Ich werde niemals die Zeiten im gemeinsamen Discord vergessen, die vielen Stunden, die wir zusammen gelacht haben und für all die Inspirationen, den Mut und die aufbauenden Worte, wenn ich mal gezweifelt habe. Ohne euch hätte ich das alles nicht schaffen können.

Zudem möchte ich mich auch bei Frau Dr. Tanja Eiler bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben hat, ihre Anwendung innerhalb dieser Arbeit zu nutzen. Ihre Expertise und Zusammenarbeit haben einen unschätzbaren Beitrag zur Weiterentwicklung meiner Forschung geleistet.

Abschließend möchte auch allen Fachleuten und Forschern auf dem Gebiet der haptischen Technologien und der virtuellen Realität danken, die durch ihre Arbeiten und Erkenntnisse das Fundament für diese Dissertation gelegt haben.

Meine Dissertation wäre ohne das Engagement und die Unterstützung all dieser Personen nicht möglich gewesen. Ihr habt mich auf diesem anspruchsvollen Weg begleitet, und ich bin euch zutiefst dankbar für eure Liebe, eure Unterstützung und eure Beiträge.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern und wünsche mir, dass diese zu weiteren Erkenntnissen und Innovationen auf dem Gebiet der haptischen Technologien in der therapeutischen Praxis führen wird. Die neuen Technologien in Kombination mit traditionellen Ansätzen könnten es ermöglichen, die Gesundheitsversorgung zu verbessern und somit den Menschen eine bessere Lebensqualität zu bieten.

Vanessa Schmücker

Abstract

In den letzten Jahren hat die Idee der Virtual Reality (VR)-Psychotherapie immer mehr an Bedeutung gewonnen, da sie immersive Umgebungen bereitstellen kann, die für unterschiedlichste Therapieansätze genutzt werden kann. Diese Innovationen werden benötigt, um den steigenden Zahlen an psychisch erkrankten Menschen gerecht zu werden sowie die Therapeuten zu unterstützen. Eine zentrale Herausforderung bei der Umsetzung von effektiven VR-Therapien ist die Schaffung einer immersiven und glaubwürdigen Umgebung, welche die Patienten dabei unterstützt, die gelernten Verfahren aus den virtuellen Umgebungen in die reale Welt zu transferieren. Die Steigerung der Immersion und die Verbesserung der allgemeinen Präsenz könnten durch haptische Technologien unterstützt werden, die derzeit auf dem Markt erscheinen und somit für Therapiepraxen zugänglich werden.

Diese Dissertation befasst sich umfassend mit haptischen Technologien zur Einbindung in therapeutisch sinnvolle VR-Anwendungen. Dazu wird ein Überblick über die Grundlagen der Haptik, Psychotherapien und Virtual Reality gegeben. Auf Basis dieser Grundlagen folgt eine ausführliche Betrachtung des aktuellen Forschungsstandes hinsichtlich haptischer Technologien und VR-Therapien.

Dieses methodische Vorgehen wird dann durch ein eigenes Konzept erweitert, welches die Integration von beispielhafter, auf dem Markt verfügbarer haptischer Technologie in verschiedensten therapeutischen Szenarien aufzeigt und unterschiedliche Arten an haptischer Technologie miteinander vergleicht. Dazu werden die Therapiefelder des kognitiven Trainings, der Suchtentwöhnung sowie der Spinnenphobie im Detail betrachtet und durch haptische Technologie ergänzt. Durch die Durchführung empirische Studien werden dann verschiedenste Aspekte, wie die Präsenzbewertung, Akzeptanz und Wirkung auf Testprobanden erhoben, um mögliche Schlüsse zu einer sinnvollen Nutzung der Technologie zu ziehen.

Insgesamt zeigt diese Dissertation eine gelungene Integration haptischer Technologien in die virtuellen Therapieanwendungen auf, die zur Weiterentwicklung von haptischer Technologie und VR-Therapieanwendungen gleichermaßen beitragen kann. So wird erkennbar, dass die unterschiedlichen haptischen Technologien verschiedenste positive Wirkungen auf die Nutzer haben, wobei der Eindruck der Technologie maßgeblich von der VR-Umgebung beeinflusst wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Motivation	2
1.3	Ziele der Arbeit	2
2	Forschungsfragen	5
2.1	Technische Fragestellungen:	5
2.2	Psychologische Fragestellungen:	6
3	Grundlagen	7
3.1	Biologische Grundlagen	9
3.1.1	Hautschichten	9
3.1.2	Taktile Wahrnehmung	11
3.1.3	Weiterleitung an das Gehirn	13
3.2	Psychologische Grundlagen	17
3.2.1	Immersion und Präsenz*	17
3.2.2	Die Bedeutung von Haptik für die Psyche	20
3.2.3	Psychische Erkrankungen	27
3.2.4	Psychotherapie	31
3.2.5	Kognitive Leistungsfähigkeit	34
3.3	Technische Grundlagen	35
3.3.1	Grundlagen der Virtual Reality	36
3.3.2	Grundlagen der Augmented Reality	38
3.3.3	Vorstellung der verwendeten Entwicklungsumgebung: <i>Unity</i> *	39
3.3.4	Blender	43
4	State of the Art	45
4.1	Forschungsarbeiten: Haptische Einsatzbereiche	47
4.1.1	Haptik im medizinischen Kontext	47
4.1.2	Muskelaktivität bei Force Feedback	48
4.1.3	Haptik und Immersion	49
4.1.4	Haptik zur Steigerung von Angst	49
4.1.5	Haptik für hörgeschädigte und gehörlose Menschen	50
4.2	Forschungsarbeiten: Haptischer Technologie	51
4.2.1	Haptische Controller	51

4.2.2	Datenhandschuhe	53
4.2.3	Weitere haptische Technologien	57
4.3	VR/AR Therapieansätze	61
4.3.1	Angststörungen	61
4.3.2	Essstörungen	67
4.3.3	Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS)	69
4.3.4	Zwangsstörungen (OCD)	71
4.3.5	Substanzabhängigkeit	73
4.3.6	Erhalt der kognitiven Fähigkeiten	75
4.4	Aktueller Stand kommerziell verfügbarer haptischer Technologie	77
4.4.1	Haptische Handschuhe	79
4.4.2	Haptische Anzüge und Westen	89
4.4.3	Weitere haptische VR-Technologien	97
5	Abschluss der Forschungsgrundlagen	105
6	Konzeptentwicklung	107
6.1	Erste Schritte	107
6.2	Wahl der haptischen Technologie	107
6.2.1	Auswahl der haptischen Handschuhe	108
6.2.2	Auswahl der haptischen Anzüge	108
6.3	Einbindung und Vergleich der Technologie	109
6.4	Integration in therapeutische Anwendungen	109
7	Eine neuartige Technologie: Der TESLASUIT	111
7.1	Einleitung	111
7.2	Vorstellung des TESLASUITS	111
7.3	Forschungsansatz	112
7.4	Ausgestaltung des Szenarios	112
7.4.1	Schritte der Exposition	113
7.5	Programmiertechnische Umsetzung	113
7.6	Herausforderungen der Technik	120
7.7	Ergebnisse	121
8	Gedächtnistraining mit Haptik	123
8.1	Einleitung	123
8.2	TactSuit X40	124

8.3	In-virtuo Gedächtnistrainingsanwendung - Grundlagen	124
8.3.1	Ablauf des ursprünglichen VR-Gedächtnistrainings	126
8.4	Programmiertechnische Umsetzung	127
8.5	Studiendesign	131
8.5.1	Studienaufbau	131
8.5.2	Art der Erhebung	132
8.5.3	Ablauf der Studie	133
8.6	Ergebnisse	135
8.6.1	Zusammenfassung	143
8.6.2	Fazit	145

9 Konzeption und Implementation einer Anwendung zum Vergleich haptischer Handschuhe 147

9.1	Einleitung	147
9.2	Manus Prime X Haptic VR	147
9.3	SenseGlove Nova	148
9.4	Konzept	149
9.5	Programmiertechnische Umsetzung	151
9.6	Studiendesign	159
9.6.1	Studienaufbau	159
9.6.2	Art der Erhebung	159
9.6.3	Ablauf der Studie	160
9.7	Ergebnisse	161
9.7.1	Zusammenfassung	165
9.7.2	Fazit	167

10 Einbindung haptischer Handschuhe in die Suchtentwöhnungsanwendung ANTARES 169

10.1	Einleitung	169
10.2	Grundlagen	169
10.3	Konzept	170
10.4	Details zur Implementation	170
10.5	Studiendesign	173
10.5.1	Studienaufbau	173
10.5.2	Art der Erhebung	173
10.5.3	Ablauf der Studie	174

10.6	Ergebnisse	175
10.6.1	Zusammenfassung	181
10.6.2	Fazit	183
11	Einbindung haptischer Handschuhe in den BAT	185
11.1	Einleitung	185
11.2	HTC Controller	186
11.3	Forschungsansatz	187
11.3.1	Ablauf des Kurbel-BAT	188
11.4	Konzept	189
11.5	Programmiertechnische Umsetzung	189
11.6	Studiendesign	196
11.6.1	Studienaufbau	196
11.6.2	Art der Erhebung	196
11.6.3	Ablauf der Studie	196
11.7	Ergebnisse	197
11.7.1	Zusammenfassung	203
11.7.2	Fazit	205
12	Eingliederung der eigenen wissenschaftlichen Publikationen in den Rahmen dieser Arbeit	207
13	Diskussion der Forschungsfragen	211
13.1	Diskussion der technischen Fragestellungen:	211
13.2	Psychologische Fragestellungen:	219
14	Fazit	225
15	Ausblick	227
	Glossar	229
	Akronyme	230
	Literaturverzeichnis	231

Abbildungsverzeichnis

1	Modellhafte Darstellung der Hautschichten	9
2	Modellhafte Darstellung der Hautschichten mit Rezeptoren [290]	11
3	Darstellung einer Nervenzelle [246]	14
4	Immersion und Präsenz	19
5	Übersicht über die Lerntypen nach Vester	23
6	Anstieg der Fehltag aufgrund von psychischen Erkrankungen im Vergleich zu Fehltagen aller Erkrankungsgruppen [55]	28
7	Häufigste Diagnose stationärer Krankenhausbehandlungen im Alter von 15-bis 24-Jahren © Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023 [311]	28
8	Häufige psychische Störungen gemäß DSM-IV (12-Monatsdiagnosen) nach RKI und ihr Anteil in Prozent [249]	31
9	Die Benutzeroberfläche von <i>Unity</i> mit farblichen Markierungen	40
10	Modellhafte Darstellung zur Veranschaulichung der Versuchstechnik (a): <i>HTC VIVE</i> Controller [50], (b): <i>Geomagic Touch X</i> [226], (c): 2D Setup mit einer Maus	47
11	Darstellung einiger Controllererweiterungen	52
12	Experimentelle haptische Handschuhe	53
13	Weitere experimentelle haptische Technologien im Überblick	57
14	Darstellung der betrachteten Datenhandschuhe	84
15	Darstellung der betrachteten Datenhandschuhe (2)	87
16	Darstellung der betrachteten haptischer Westen	93
17	Darstellung der betrachteten haptischer Westen (2)	96
18	Darstellung weiterer haptischer Geräte	101
19	Darstellung weiterer haptischer Geräte (2)	103
20	Darstellung des Expositionsraums in VR	114
21	VR-Ansicht der (a)Weltraumscene und (b)Bergscene	126
22	Web-Applikation von <i>bHaptics</i> zur Erstellung von haptischen Materialien	129
23	Optionsfenster der Memory-Anwendung	131
24	SenseGlove (links) - Manus Prime X Haptic (rechts)	148
25	VR-Ansicht der ersten Aufgabenstellung (Manus)	153
26	Die verschiedenen Gesten der ersten Aufgabenstellung	153
27	Darstellung der Hände und Trackingpunkte im VR-Raum (Manus)	154
28	Tisch mit Objekten ohne haptischen Eindruck	155

29	Tisch mit haptischen Objekten und zugehöriger Beschreibung	156
30	VR-Ansicht der <i>ANTARES</i> -Anwendung mit einem rot markierten, raucherbezogenen Objekt	171
31	<i>HTC VIVE Pro</i> Controller [342]	186
32	Aufbau der Kurbelkonstruktion des realen Behavioral Approach: Kinnstütze (links), Sicht des Nutzers (rechts)	187
33	Darstellung des Kurbel-BAT Raums in VR	191
34	Darstellung des erweiterten Kurbel-BAT Raums in VR	192
35	Ausschnitt der resultierenden CSV-Datei	195

Gender-Hinweis

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Dissertation das generische Maskulinum verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

Hinweise auf Wiederverwendung

Einige Grundlagen dieser Arbeit stammen aus der Masterarbeit „Konzeption und Implementierung eines Gedächtnistrainings in der virtuellen Realität unter Verwendung individueller Memoiren“ der Autorin Vanessa Schmücker aus dem Jahre 2020 [267]. Durch die Themenähnlichkeit wurde entschieden, einige Abschnitte wiederzuverwenden. Die entsprechenden Kapitel, die diese enthalten, sind durch einen Stern* gekennzeichnet.

1 Einleitung

Die psychische Gesundheit ist ein wesentlicher Bestandteil des allgemeinen Wohlbefindens und gilt als grundlegendes Recht. Eine gute psychische Gesundheit ermöglicht eine hohe Lebensqualität durch das Knüpfen sozialer Kontakte und dem Bewältigen der täglichen Aufgaben und Herausforderungen durch die Regulation der Emotionen. Diese Regulation kann durch psychische Erkrankungen gestört werden, wodurch es für einige Personen zu einer Abnahme des Wohlbefindens, zu Leidensdruck und emotionalem Stress führen kann. Nach dem Bericht der Weltgesundheitsorganisation (WHO) sterben Menschen mit schweren psychischen Störungen zehn bis 20 Jahre früher als die allgemeine Bevölkerung [128].

Die während dieser Arbeit vorherrschende Covid-19-Pandemie hat sich nicht nur auf die körperliche Gesundheit, sondern auch auf die psychische Gesundheit ausgewirkt. Nach der WHO [128] sind die Zahlen von Personen mit Angststörungen und Depressionen während des ersten Jahres der Pandemie um 25% angestiegen, wogegen sich die Behandlungslücke für psychisch erkrankte Personen vergrößert hat. Weltweit leidet fast jeder Achte an einer psychischen Krankheit, wogegen nur 2% des Gesundheitsbudgets durchschnittlich für die Behandlung solcher Erkrankungen eingesetzt wird.

1.1 Problemstellung

Um dem Behandlungsbedarf nachzukommen, wurde ab 2017 damit begonnen, das System der Psychotherapie in Deutschland zu reformieren, angefangen mit den Richtlinien [265]. Jedoch gibt es Herausforderungen, welche nicht durch die Reformierung des Systems alleine gelöst werden können. So sind viele Therapien sehr aufwendig und für einige Praxen nur schwer umsetzbar. Angststörungen, wie beispielsweise die Arachnophobie (die Angst vor Spinnen), können derzeit nur von Praxen therapiert werden, welche die Tiere ordnungsgemäß halten und pflegen können.

Seit einigen Jahren werden neue Technologien zur Unterstützung der Behandlung von psychischen Erkrankungen erforscht, darunter die Verwendung von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) Technologien. Diese ermöglichen es, Therapien virtuell umzusetzen oder zu ergänzen. Jedoch werden bisher nur visuelle und auditive Signale in der Therapie an die Nutzer weitergegeben. Das „Fühlen“ dieser virtuellen Welt ist derzeit

noch nicht berücksichtigt. Obwohl es bereits experimentelle haptische Hardware gibt, die in therapeutischen Anwendungen verwendet werden könnte, ist diese für die Allgemeinheit nicht zugänglich und wird meist nur im Forschungskontext genutzt. Auf dem Markt verfügbaren haptischen Technologien mangelt es dagegen an umfassenden Forschungen zu ihrer Integration, Wirkung und möglichen Verwendung im Therapiebereich.

1.2 Motivation

Das Interesse der Autorin am psychologischen Bereich bestand schon vor dieser Arbeit und begleitete ihr gesamtes Informatikstudium. So wurden die Bachelor- und Masterarbeit vom Lehrstuhl für Entwicklungspsychologie und klinische Psychologie der Lebensspanne der Universität Siegen begleitet und gaben Einblicke in die Bereiche von ADHS und Demenzerkrankungen.

Die schwierige Zeit um die Covid-19-Pandemie, sowie der persönliche Kontakt zu psychisch erkrankten Personen im eigenen Umfeld haben diese Arbeit maßgeblich geprägt und den Wunsch, erkrankte Personen zu unterstützen und die Versorgung zu verbessern, beeinflusst.

1.3 Ziele der Arbeit

Im Rahmen dieser Dissertation soll untersucht werden, ob und wie die derzeit auf dem Markt befindlichen haptischen Technologien sinnvoll in therapeutische Anwendungen eingebunden werden können. Dabei stellen sich die Fragen, welche Herausforderungen, aber auch Möglichkeiten sich aus dieser neuen Technologie ergeben und wie sie Einfluss auf die Nutzer nimmt.

Die grundlegende Haupthypothese besteht darin, dass die Haptik die Immersion und Präsenz steigern kann. Dies sind wichtige Faktoren bei der Nutzung von virtuellen Anwendungen, die als Indikator für die Qualität der virtuellen Welt dienen können. Eine Steigerung der Qualität und der Glaubwürdigkeit der virtuellen Welt könnte wiederum den Therapieeffekt unterstützen. So könnte das in der virtuellen Welt gelernte Verhalten von den Patienten besser in den Alltag übertragen werden, was Rückfall- und Abbruchquoten von Patienten reduziert.

Um die Gültigkeit dieser Hypothese prüfen zu können, müssen jedoch einige Grundlagen geschaffen werden. Neben den klassischen Forschungsgrundlagen wird sich innerhalb dieser Dissertation mit der aktuellen haptischen Technologie auseinandergesetzt. Dazu müssen die technischen Module betrachtet und gegeneinander abgewogen werden, um sie anschließend in eine entsprechende Anwendung sinnvoll zu integrieren. Ebenfalls müssen die psychologischen Grundlagen geschaffen, aktuelle VR-Therapien betrachtet und die Möglichkeiten der Einbindung haptischer Technologien in diese herausgearbeitet werden. Da sich die Therapiefelder jedoch weit erstrecken, können im Rahmen dieser Arbeit nur einige beispielhafte Anwendungen und Bereiche betrachtet werden.

Das Ziel ist es von technischer Seite aus heraus zu finden, wie gut sich die aktuellen haptischen Technologien nutzen lassen. Nicht nur der Umgang mit einzelnen Modulen, sondern auch die Integration in Virtual Reality-Anwendungen soll genau betrachtet werden. Das Einbinden in bereits bestehende Therapieanwendungen kann hier von besonderem Interesse sein, da so bereits umgesetzte VR-Therapien durch die Technik ergänzt und nicht völlig neu konzipiert werden müssten.

Von der psychologischen Seite aus muss die Wirkung der haptischen Technologie untersucht werden. Wie unterscheiden sich Anwendungen mit und ohne haptische Eindrücke und wie wirkt sich das auf die Bewertung einzelner Szenarien aus? Profitieren gewisse Szenarien durch diese Technologie oder kann es auch zu negativen Effekten kommen? Zusätzlich müssen die Rahmenbedingungen für therapeutische Praxen berücksichtigt werden. So ist es wichtig, dass die Technologie für fachfremdes Personal zugänglich und nutzbar ist. Ebenfalls sollte es sich in einem angemessenen preislichen Rahmen halten und idealerweise über eine Schnittstelle verfügen, mit der eine eigene Entwicklung ermöglicht wird.

2 Forschungsfragen

Um die Wirksamkeit der unterstützenden Therapie mithilfe neuer Medien im konkreten Fall der virtuellen Realität in Verbindung mit Haptik untersuchen zu können, müssen unterschiedliche Fragestellungen beantwortet werden. Diese teilen sich in die psychologischen Fragestellungen mit Fokus auf den therapeutischen Mehrwert und in die technischen Fragestellungen auf, welche sich auf die Umsetzung von haptischer Technik mit der VR fokussieren.

2.1 Technische Fragestellungen:

1. Wie gut kann haptische Technologie in (bestehende) Anwendungen eingebunden werden?
 - Zur Nutzung haptischer Technologien sind spezifische Schnittstellen erforderlich. Diese werden meist von den Entwicklern bereitgestellt. Jedoch ist die Handhabung, Dokumentation und Wartung dieser SDKs sehr unterschiedlich. Welche haptische Technologie bietet eine gute Anbindung? Wo könnten Schwierigkeiten auftreten? Wie gut können bereits bestehende Anwendungen um spezifische Technologien erweitert werden?
2. Welche Vor- und Nachteile bieten diverse haptische Technologien?
 - Verschiedene Technologien bieten andersartige Umsetzungen des haptischen Eindrucks. Worin unterscheiden sich spezifische haptische Techniken? Wo sind Gemeinsamkeiten? Wie wird der haptische Eindruck simuliert? Welche Herausforderungen und Möglichkeiten gibt es bezüglich der Umsetzung?
3. Welche haptischen Technologien können sinnvoll miteinander verbunden werden?
 - Es könnte sinnvoll sein, nicht nur eine haptische Technik zu nutzen, sondern diese zu kombinieren. Welche der möglichen Technologien lassen sich verbinden und gemeinsam nutzen? Behindern sich verschiedene Schnittstellen gegenseitig? Gibt es womöglich auch Nachteile oder Herausforderungen bei der gemeinsamen Nutzung?
4. Für welche Zielgruppe eignen sich haptische Technologien und für welche nicht?
 - Gibt es Altersgruppen oder Personengruppen, die besonders von haptischer Technologie profitieren können oder für die diese Technologie nicht infrage kommt? Welche Gründe könnte es dafür geben?

5. Welche haptischen Technologien eignen sich für den Therapiealltag mit VR?
 - Welche der besprochenen haptischen Technologien kommen für die Therapiepraxen infrage? Gibt es kostengünstige haptische Technologien, die von Therapeuten genutzt werden können? Mit welchen VR-Sets sind die Technologien kompatibel? Welche haptischen Erweiterungen lassen sich auch von weniger technikaffine Personen handhaben und warten?

2.2 Psychologische Fragestellungen:

1. Verändert haptische Technologie die Wahrnehmung der Nutzer innerhalb der virtuellen Realität?
 - Wie wird die virtuelle Realität mit Haptik wahrgenommen? Gibt es Unterschiede in der Bewertung einzelner Szenarien oder Aufgabenstellungen mit und ohne haptischer Technologie?
2. Hat haptische Technologie einen Einfluss auf die Immersion innerhalb einer virtuellen Realität?
 - Die Präsenz, bestehend aus unterschiedlichen Komponenten, gibt an, wie stark Personen in die virtuelle Welt eingebunden sind und in welchem Maße sie diese als „aktuelle Realität“ bewerten. Diese Komponenten können mit standardisierten Fragebögen erfasst werden. So kann ermittelt werden, in welchem Maße beispielsweise der Realismus oder die Möglichkeit zu interagieren, von verschiedenen haptischen Technologien beeinflusst wird.
3. Wie nehmen Nutzer die diversen haptischen Technologien an?
 - Gibt es Technologien, die bevorzugt werden? Welche haptischen Erweiterungen wünschen sich die Nutzer? Welche möglichen Vor- und Nachteile ergeben sich aus der Haptik?
4. Hat die Haptik einen Einfluss auf die Effektivität der Therapie?
 - Was wird benötigt, um die Effektivität und die Übertragbarkeit von virtuellen Therapien durch Haptik zu verbessern? Kann Haptik dazu beitragen, die in VR erlernten Verhaltensweisen in den Alltag zu integrieren? Welche Therapieansätze profitieren besonders von Haptik und welche Technologien eignen sich besonders für VR-Therapieanwendungen?

3 Grundlagen

Das folgende Kapitel widmet sich den Grundlagen, welche benötigt werden, um die verschiedenen Ansätze dieser Dissertation in Gänze zu verstehen. So wird die Haptik als biologischer Impuls erläutert, welcher über die Haut aufgenommen und an das Gehirn weitergetragen wird. Anschließend folgen die Grundlagen zu den Begriffen der Immersion und Präsenz, die bereits im Zusammenhang mit der Haupthypothese dieser Arbeit genannt wurden. Diese psychologischen Faktoren können dazu beitragen, die Qualität einer virtuellen Realität zu bewerten und ihren psychologischen Mehrwert abzuschätzen. Ebenfalls kommt die Wirkung haptischer Eindrücke auf die Psyche zur Sprache, die verschiedene Vorteile bieten können, welche in den späteren Anwendungen Berücksichtigung finden. Daraufhin folgt das Feld der Psychotherapien, auf das sich im Speziellen in dieser Arbeit konzentriert wird. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Darlegung der technischen Hintergründe. Hierzu gehört die Erläuterung von Virtual Reality und Augmented Reality, sowie die Vorstellung der Programme, welche für die Entwicklung und Erweiterung der hier besprochenen psychotherapeutischen VR-Anwendungen mit Haptik verwendet wurden.

3.1 Biologische Grundlagen

Die Haut ist eines der wichtigsten Sinnesorgane des menschlichen Körpers. Sie ermöglicht es, zu „fühlen“ und die Umgebung wahrzunehmen. Zusätzlich bietet diese Schutzschicht die Möglichkeit des Gasaustausches und des Stoffwechsels. Ein erwachsener Mensch besitzt durchschnittlich etwa 1,7 Quadratmeter Hautoberfläche, wodurch die Haut als das größte Sinnesorgan des Körpers gilt. Insgesamt bedeckt sie ca. 96% der gesamten Körperoberfläche. Darüber hinaus spielt die Haut eine lebenswichtige Rolle bei der Regulierung der Körpertemperatur und ist daher für das Überleben des Menschen unerlässlich. Ein Verlust von nur 20% der Haut ist bereits lebensbedrohlich und kann zum Tode führen [2, 259].

3.1.1 Hautschichten

Aufgrund der entscheidenden Rolle, die die Haut für den Menschen spielt, ist ihre Struktur äußerst komplex. Sie besteht aus unterschiedlichen übereinander liegenden Schichten (siehe Abbildung 1), die dafür sorgen, dass Stoffe, wie Flüssigkeiten oder Gase, ausgeschieden bzw. aufgenommen werden können, während der Körper geschützt bleibt. Die Elastizität der Haut ermöglicht es, den Körper zusammenzuhalten, obwohl sie gleichzeitig die zuvor erwähnten Funktionen erfüllt. Um ein besseres Verständnis für die Funktionsweise der Haut zu erlangen, werden im nächsten Schritt die drei Hautschichten detailliert erläutert und ihre spezifischen Aufgaben genauer beschrieben [259].

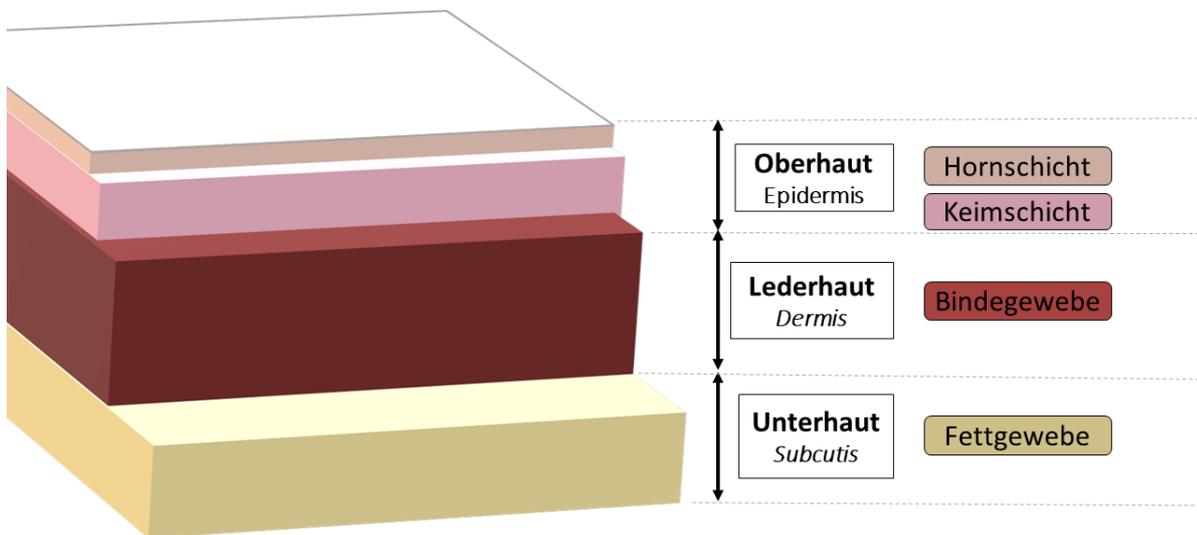


Abbildung 1: Modellhafte Darstellung der Hautschichten

Oberhaut (Epidermis)

Die äußerste Schicht der Haut, die Oberhaut, auch Epidermis genannt, setzt sich im Allgemeinen aus fünf unterschiedlichen Schichten (Hornschicht, Glanzschicht, Körnerschicht, Stachelzellenschicht und Basalzellenschicht) zusammen. An Stellen des Körpers, die einer erhöhten Belastung ausgesetzt sind, ist die Oberhaut besonders stark ausgebildet. Diese ausgeprägte Form der Hornhaut tritt bei den meisten Menschen unter anderem an den Füßen und Händen auf. Sie besitzt eine Dicke von 0,5 mm bis zu 1,5 mm. Zum Schutz werden sogenannte Hornhautplättchen gebildet, welche nach Verbrauch nach oben gedrängt und dort abgeschliffen werden. Die primären Aufgaben der Epidermis sind die Abgrenzung nach außen und die Aufrechterhaltung der Stabilität und Elastizität der Haut. Sie ist als Schutzschicht zu betrachten. Ebenfalls befinden sich in dieser Schicht die *Merkel-Zellen*, die den Menschen zur Druckwahrnehmung befähigen. Diese werden zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal genauer betrachtet [104, 195, 258, 259].

Lederhaut (Dermis, Corium)

Nach der Oberhaut folgt die zweite Schicht, die sogenannte Lederhaut. Sie unterteilt sich in zwei Schichten, die Papillarschicht, die der Versorgung der nicht durchbluteten Epidermis dient, und der Netzschicht, welche für die Straffheit der Haut sorgt. Gemeinsam mit dem Unterhautzellengewebe ist die Lederhaut der größte Wasserspeicher des menschlichen Körpers. Die Dicke dieser Schicht variiert je nach ihrer Position auf dem menschlichen Körper. Neben der Ablagerung von nicht abbaubaren Stoffen, unter anderem Tattootinte, befinden sich hier einige haptische Rezeptoren. Auf jeden Quadratzentimeter Haut befinden sich durchschnittlich 200 Schmerzrezeptoren, 100 Druckrezeptoren sowie 12 Kälte- und 2 Wärmerezeptoren, welche den Körper dazu befähigen, einen Großteil der Umwelt wahrzunehmen [105, 195, 257, 259].

Unterhaut (Subcutis)

Die unterste Schicht der Haut ist die sogenannte Unterhaut (Subcutis). Sie besteht hauptsächlich aus lockerem Bindegewebe und Fettzellen und ist nur gering durchblutet. Aus diesem Grund nutzen Ärzte diesen Bereich für Injektionen. Die Unterhaut ist ein Vermittler zwischen Haut und den tiefer gelegenen Organen wie den Muskeln und Knochen. In dieser Schicht sind Fette und Wasser eingelagert. Die Aufgabe dieser Schicht besteht darin, die darüber liegenden Hautschichten mit Sauerstoff und Nährstoffen zu versorgen. Darüber hinaus fungieren die in der Unterhaut eingelagerten Fette als wichtige Wärmeisolatoren und dienen als Nahrungsreserve. Neben den Haarwurzeln und Schweißdrüsen befinden sich hier ebenfalls verschiedene Arten an Rezeptoren, darunter

die *Krause-Körperchen*, die *Vater-Pacini-Körperchen*, aber auch *Ruffini-Körperchen* [106, 195, 259, 260].

Hautanhangsgebilde

Zusätzlich zu den Hautschichten gibt es die sogenannten Hautanhangsgebilde. Diese sind keine Hautschichten, sondern, wie der Name bereits vermuten lässt, Gewebestrukturen, die zu der Haut gehören. Darunter gibt es Haare, Nägel sowie unterschiedliche Arten von Hautdrüsen, wie Talg-, Milch- und Schweißdrüsen [4, 195, 259].

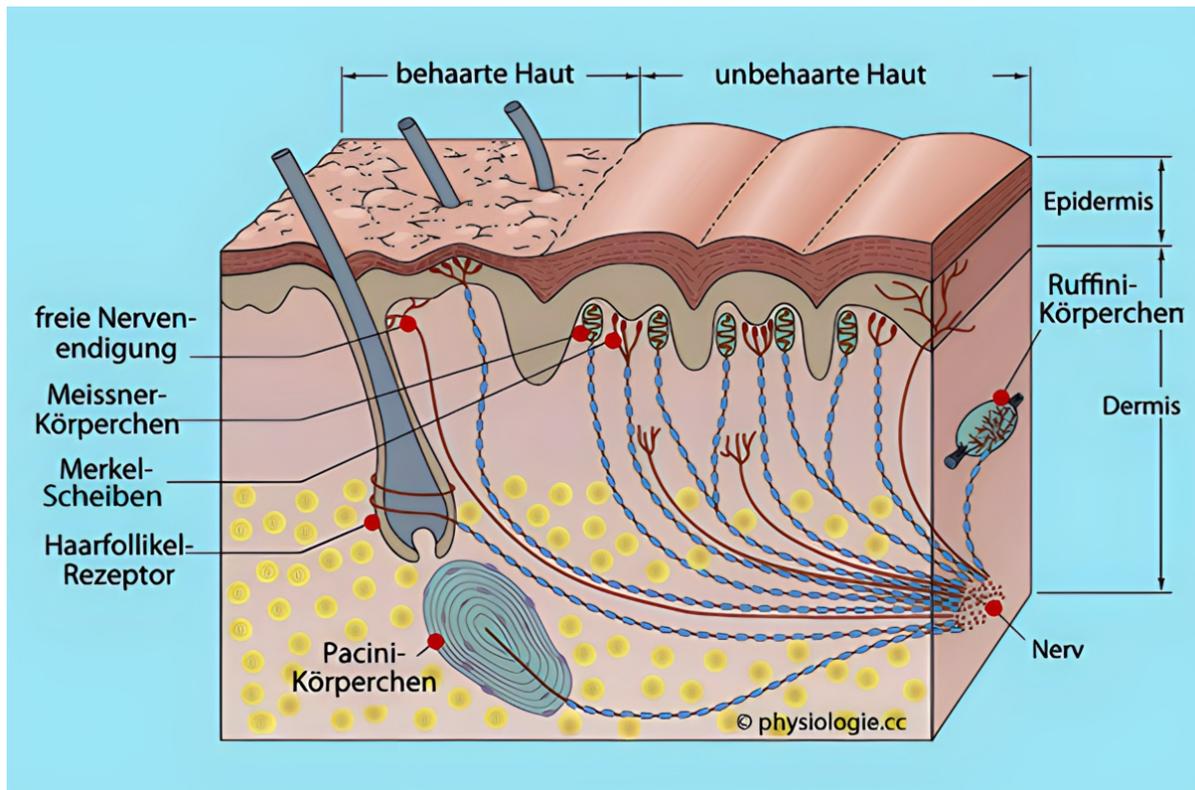


Abbildung 2: Modellhafte Darstellung der Hautschichten mit Rezeptoren [290]

3.1.2 Taktile Wahrnehmung

Die Taktile Wahrnehmung bezieht sich auf die Fähigkeit, Berührungen und Druck zu spüren und zu interpretieren. Sie umfasst die Wahrnehmung von taktilen Reizen wie Kälte, Wärme, Vibrationen, Schmerz, Textur, Gewicht und Form. Die taktile Wahrnehmung ist ein wichtiger Aspekt der sensorischen Wahrnehmung, da sie es ermöglicht, das Umfeld durch Berührungen zu erkunden und wichtige Informationen über die Beschaffenheit von Objekten zu erhalten. Dazu werden die Rezeptoren und Nervenendungen in der Haut benötigt. Im Folgenden werden diese genauer vorgestellt.

Temperaturrezeptoren

Veränderungen der Temperatur in der Umgebung und im Körper können über sogenannte Thermorezeptoren wahrgenommen werden. Diese freien Nervenendungen senden elektrische Signale an das Nervensystem, je nachdem welcher Art sie angehören. Kälterezeptoren reagieren auf Hauttemperaturen unter 30°C und signalisieren dem Körper ein Gefühl von Kälte, während Wärmerezeptoren ab einer Hauttemperatur von etwa 36°C aktiv werden und Wärme registrieren. Hierbei gibt es marklose und markhaltige Rezeptoren, die sich in der Geschwindigkeit der Reaktion unterscheiden [5, 30, 261, 367].

Nozizeption/Schmerzrezeptoren

Auch Schmerzreize werden über freie Nervenendungen wahrgenommen. Jedoch befinden sich wesentlich mehr Schmerzrezeptoren im menschlichen Gewebe als Thermorezeptoren. Abhängig von der Lage können bis zu 200 Schmerzrezeptoren pro 1 cm² in der Haut liegen. Die Empfindung von Schmerz kann unterschiedliche Ursachen haben. Thermische Schmerzrezeptoren reagieren beispielsweise bei Temperaturen unter 10°C oder über 45°C. Die Schmerzwahrnehmung ist ein wichtiger Schutzmechanismus, der den menschlichen Körper vor potenziell schädlichen Reizen warnt [30, 261, 367].

Mechanorezeptoren

Mechanorezeptoren sind spezifische Sinneszellen, die auf mechanische Reize wie Vibration, Berührungen, Dehnungen und Bewegungen reagieren. Im Folgenden werden einige spezifische Mechanorezeptoren noch einmal im Detail vorgestellt:

Druckrezeptoren Druckrezeptoren sind Rezeptoren, die auf die Formveränderung der Haut reagieren, wobei sich die Spannung innerhalb des Gewebes verändert.

Die *Ruffini-Körperchen* können Dehnungen der Haut in Richtung und Stärke registrieren und sind für die Wahrnehmung von Hautspannung und Bewegung verantwortlich. Sie befinden sich zwar über die gesamte untere Lederhautschicht verteilt, kommen allerdings im Vergleich deutlich seltener vor als andere Rezeptortypen [232, 261, 367].

Auch die *Merkel-Zellen* zählen zu den Druckrezeptoren. Anders als die *Ruffini-Körperchen* reagieren diese auf anhaltende Berührungen, ohne an Empfindsamkeit zu verlieren und kommen neben den Handinnenflächen und Fußsohlen, auch in behaarter Haut vor. Die *Merkel-Zellen* liegen in der Oberhaut und sind flächendeckend über den gesamten Körper verteilt [30, 232, 261].

Vibrationsrezeptoren Die *Vater-Pacini-Körperchen* können zunehmende Druckreize zu Beginn und am Ende einer Berührung wahrnehmen, nehmen jedoch bei andauern-

dem gleichen Reiz schnell an Empfindsamkeit ab. Daher sind sie besonders für die Vibrationsregistrierung verantwortlich, da die Richtung und Geschwindigkeit bei solchen Einflüssen nicht konstant gleich bleibt, sondern sich der Druck permanent ändert. Die *Vater-Pacini-Körperchen* liegen in der Unterhaut, befinden sich aber auch in Organen. Diese wichtigen Lamellenkörperchen sind mit bis zu einem Millimeter Größe recht groß und können sogar mit dem bloßen Auge erkannt werden. Neben ihnen gibt es noch die *Krause-Körperchen*, eine kleinere Variante der *Vater-Pacini-Körperchen*, die sich im oberen Bereich der Lederhaut befinden [30, 232, 261, 367].

Tastrezeptoren Die *Meissner-Körperchen*, auch Tastkörperchen genannt, reagieren auf leichte Berührungen, Vibrationen und schnelle Änderungen der Oberfläche. Sie befinden sich in einer besonders hohen Konzentration in unbehaarter Haut wie der Fingerbeere und in den Lippen. Bei ihnen nimmt die Empfindsamkeit wie bei den *Vater-Pacini-Körperchen* schnell ab und sie können konstante Berührungen nicht wahrnehmen.

Häufig werden auch die *Merkel-Zellen* als Tast-Zellen genannt, auch wenn diese nur auf Druckimpulse reagieren. Jedoch tragen sie ebenfalls eine wichtige Rolle bei der taktilen Wahrnehmung bei und ermöglichen durch ihre andere Lage und Struktur gemeinsam mit den *Meissner-Körperchen* eine deckende Wahrnehmung [30, 261, 367].

Der Tastsinn ist bei blinden Personen besonders gut ausgeprägt. Aus diesem Grund kann beispielsweise die Blindenschrift genutzt werden, um den sonst visuellen Eindruck in haptischer Darstellung an blinde Menschen zu vermitteln [73].

3.1.3 Weiterleitung an das Gehirn

Nachdem die taktilen Reize von den Rezeptoren aufgenommen wurden, werden sie in Form von elektrischen Signalen durch das Nervensystem geleitet. Bei offenen Nervenenden entsteht durch Schmerz oder Temperatur ein elektrischer Impuls. Bei Mechanorezeptoren wird die Verformung des Gewebes direkt auf die Ionenkanäle übertragen. Demnach ist das Membranpotenzial proportional zur Stärke des mechanischen Reizes, welche auf die Haut wirkt. Dieses Membranpotenzial ist in beiden Fällen letztlich ausschlaggebend, ob ein Signal weitergeleitet wird oder nicht. Ist dieses zu schwach und übersteigt es nicht das Schwellenpotential der angrenzenden Nervenzelle, so wird das Signal nicht weiter gegeben. Andernfalls geschieht Folgendes:

Die Weiterleitung von Signalen geschieht wie zuvor genannt über das Nervensystem. Dies sind Ketten aus Nervenzellen, welche Signale bis an das Gehirn weiterleiten, wo

diese Signale letztlich verarbeitet werden. Eine Nervenzelle besteht aus Dendriten, einem Zellkern und einer Axonleitung, welche in regelmäßigen Abständen mit Myelinscheiden ummantelt ist, sowie aus den Synapsen, welche mit den Dendriten einer weiteren Nervenzelle verbunden sind (siehe Abbildung 3).

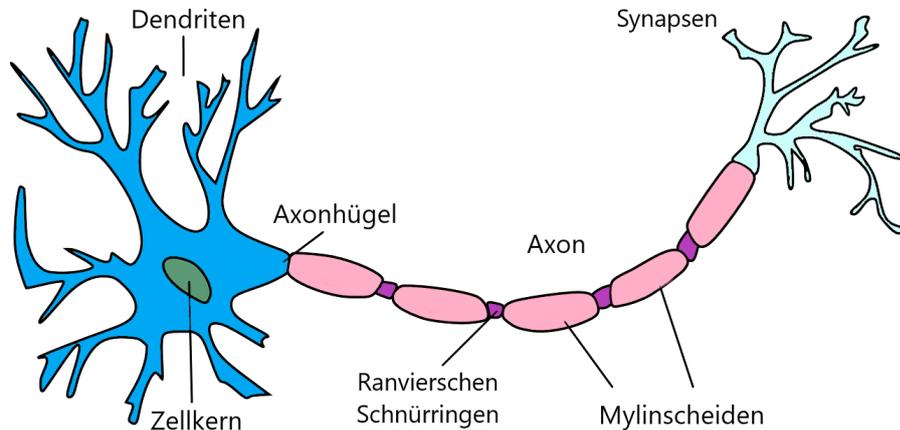


Abbildung 3: Darstellung einer Nervenzelle [246]

Der Zellkern ist für die Zellfunktionen zuständig und bündelt die Dendriten und ihre ankommenden Signale am Axonhügel. Dies ist der Übergang zwischen dem Dendriten und dem Axon selbst.

Am Axonhügel wird das zuvor erwähnte Schwellenpotential geprüft. Nur wenn die gesammelten Signale der Dendriten dieses überschreiten, wird das Aktionspotential und somit das Signal an das Axon übermittelt. Dieses kann zum Teil mehrere Meter lang sein.

Die Synapsen gelten als Übertragungsstellen und geben die Erregung an die nächste Nervenzelle weiter. Dazu befinden sich in der präsynaptischen Membran am Ende der Nervenzelle Vesikel mit chemischen Botenstoffen, den Neurotransmittern. Wenn das Aktionspotential dort ankommt, öffnen sich die Calcium-Ionenkanäle. Die Erhöhung der Calcium-Konzentration in der präsynaptischen Membran sorgt dafür, dass die Vesikel mit der Membran verschmelzen und in Richtung der anliegenden Nervenzelle einen Botenstoff freisetzen. Diese freigesetzten Botenstoffe setzen sich nun an die Rezeptoren der Ionenkanäle der angrenzenden Nervenzelle, wodurch Natrium-Ionen in die neue Zelle eindringen. Diese Natrium-Ionen, welche über die Dendriten aufgenommen werden, bilden dann das neue Potenzial am Axonhügel. Zur selben Zeit lösen sich die Botenstoffe wieder von den Rezeptoren. Dies führt dazu, dass das weitere Einströmen von Natrium-Ionen gestoppt wird und die Signalstärke reguliert werden kann. Das erhaltene Membranpotential wird

in der neuen Zelle dann erneut mit dem Schwellenpotential geprüft [30, 99, 114, 375].

Dies ist natürlich nur eine sehr oberflächliche Betrachtung der biologischen Prozesse, die hinter der haptischen Wahrnehmung stehen. Jedoch zeigt sich, wie viele biochemische Prozesse im Hintergrund ablaufen, wenn ein einzelnes Signal durch haptische Berührung freigesetzt wird und wie viele unterschiedliche Rezeptoren bei einer einzelnen Berührung aktiviert werden. Dementsprechend ist die Simulation eines einzelnen haptischen Eindrucks sehr komplex und umfasst eine Vielzahl an Faktoren.

Mit diesem Wissen können die Ideen der verschiedenen technologischen Ansätze besser verstanden werden. Darüber hinaus hilft dieses Wissen dabei zu erkennen, wie komplex selbst eine einzige Berührung sein kann und warum die haptische Darstellung durch technologische Erweiterungen keineswegs trivial ist.

3.2 Psychologische Grundlagen

Nachdem die Reize, wie zuvor erklärt, im Gehirn ankommen, erfolgt dort eine Weiterverarbeitung der Signale. Hierbei ist jedoch nicht nur der haptische Eindruck allein entscheidend, sondern auch die auditiven und visuellen Reize, die auf den Menschen zeitgleich einwirken. So ergibt sich ein psychologischer Gesamteindruck des Geschehens. Bei optimaler Nutzung und Simulation dieser Eindrücke durch Techniken wie Virtual Reality oder Augmented Reality können so erfolgreiche Therapieumfelder für Patienten geschaffen werden, die Betroffene bei der Heilung unterstützen können.

Im ersten Teil dieses Abschnitts werden die allgemeinen psychologischen Grundlagen von Virtual Reality und Augmented Reality behandelt. Die Faktoren der Immersion und Präsenz gelten dabei als wichtige psychologische Wegpfeiler bei der optimalen Nutzung von Virtual Reality. Die erfolgreiche Verwendung der virtuellen Welt ist nur möglich, wenn sie in all ihren Facetten überzeugen kann. Dabei könnte die Haptik unterstützend wirken.

Zudem erzeugt die Haptik eigene psychologische Effekte, die anschließend in Kürze betrachtet werden. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird ein allgemeiner Überblick über das Thema Therapie gegeben sowie verschiedenste Therapieansätze betrachtet. Basierend auf diesem Wissen können später eigene, mit Haptik ergänzte Anwendungen entwickelt werden, die auf verschiedene Krankheitsbilder abgestimmt sind.

3.2.1 Immersion und Präsenz*

Die mentale Erfahrung in der virtuellen Realität ist von großer Bedeutung für dieses Forschungsgebiet. Durch das Erzeugen vieler Sinneseindrücke kann für den Nutzer die Illusion entstehen, dass die computergenerierte Welt real sei. Dieser Faktor bietet in der Forschung viele Möglichkeiten und stellt einen zentralen Aspekt dieser Technologie dar. Die „perfekte“ virtuelle Realität würde demnach sämtliche Sinneseindrücke über den Computer generieren, um den Nutzer ganz von dem Eindruck der Wirklichkeit dieser erstellten Welt zu überzeugen [70].

Immersion

Um diesen Eindruck zu beschreiben, wurde in Bezug auf die virtuelle Realität der Begriff der Immersion etabliert. Immersion wird von dem lateinischen Verb „immergere“ abgeleitet, welches für „eintauchen“ oder „versenken“ steht und gibt den Grad des Eintauchens bzw. Vertiefens einer Person in die virtuelle Umgebung an [133].

„Die Immersion (fachsprachlich für das Eintauchen in eine künstliche Welt) beschreibt den durch eine Situation, Umgebung oder grafische Darstellung hervorgerufenen Effekt, der das Bewusstsein des Nutzers mehr oder minder in den Hintergrund treten lässt, sodass die virtuelle Umgebung als real beziehungsweise als Realität empfunden wird.“

Nikolayi Engelmann [78, 207]

Präsenz

Ein weiterer zentraler Begriff, der zur Beschreibung der mentalen Aspekte der VR-Anwendung dient, ist die sogenannte Präsenz. Präsenz ist hierbei die Abkürzung für den Begriff der „Telepräsenz“ und beschreibt einen psychologischen Zustand, bei welchem die Rolle von Technologie nicht mehr erkannt wird, obwohl Teile der aktuellen Erfahrung des Individuums durch diese Technik vermittelt wird [97, 236]. Nach Schubert, Friedmann und Regenbrecht kann die Präsenz als angestrebtes Ergebnis der Immersion gesehen werden [319]. Das allgemeine Gefühl der Präsenz ist mehrdimensional [236], unterteilt sich dabei aber in die zwei großen Pfeiler: *physische Präsenz* und *soziale Präsenz*.

Die physische Präsenz beschreibt das Gefühl, Teil der dargestellten Umgebung zu sein. Diese wird oft durch hochwertige VR-Erfahrungen erreicht, bei denen die Person durch visuelle, auditive und haptische Reize in die Umgebung eintaucht. Hierzu zählt auch der Aspekt der Umweltpräsenz, der beschreibt, wie sehr die virtuelle Umgebung von der Person wahrgenommen wird und wie diese Umgebung auf die Personen reagiert. Die soziale Präsenz hingegen bezieht sich auf die Interaktivität einer virtuellen Umgebung, meist durch die Anwesenheit von anderen Personen und die Interaktion mit diesen [274, 275].

Für die virtuelle Realität ist die physische Präsenz von größerer Bedeutung und lässt sich unter anderem durch Mechanismen wie „Ortsillusion“, „Plausibilitätsillusion“ und „Involviertheit“ erzeugen [70]. Die soziale Präsenz kann durch Methoden wie Multiplayer-Funktionen geschaffen werden, die den Effekt der Präsenz noch weiter verstärken. Jedoch ist es mit der derzeitigen Technik herausfordernd, andere Personen realistisch in die virtuelle Realität einzubinden, was dazu führen kann, dass die Präsenz nachlässt, wenn unzureichende Möglichkeiten genutzt werden.

Ortsillusion Die Ortsillusion beschreibt die Wahrnehmung des Nutzers gegenüber der virtuellen Umgebung, in der er sich befindet. Diese wird durch verschiedene Technologien erzeugt, einschließlich VR-Brillen (HMDs), die dem Benutzer visuelle und auch akustische Informationen in Echtzeit liefern. Wenn die visuellen, auditiven und haptischen Signale in der virtuellen Umgebung realistisch und konsistent sind, kann die Illusion verstärkt werden. Das stereoskopische Bild muss dabei den Bewegungen des Nutzers realistisch folgen, um ihm einen glaubwürdigen Eindruck der Umgebung zu vermitteln [70, 236].

Plausibilitätsillusion Präsenz kann nur dann herrschen, wenn sich die Inhalte und Objekte einer simulierten Welt auch glaubwürdig verhalten. Ob von dem Nutzer hervorgerufen oder von der Anwendung initiiert, sollten die Inhalte verlässlich, sinnvoll und nachvollziehbar reagieren. Um eine Plausibilitätsillusion zu schaffen, ist es sinnvoll, sich an der Realität zu orientieren und das reale Verhalten der Objekte in die virtuelle Welt zu übertragen. So können sich die Benutzer in der virtuellen Umgebung zurechtfinden und das Erlebte besser wieder in die Realität übertragen [70, 236].

Involviertheit Involviertheit beschreibt den Grad des Interesses, welches der Anwender dem System entgegenbringt. Gute Systeme, die hohe Präsenz hervorrufen, können dazu beitragen, die Aufmerksamkeit auf sich zu lenken, um dafür zu sorgen, dass der Benutzer engagiert und fokussiert bleibt. Auf diese Weise kann auch von den Schwächen der Technik abgelenkt werden, um die Immersion weiter zu steigern [70, 236].

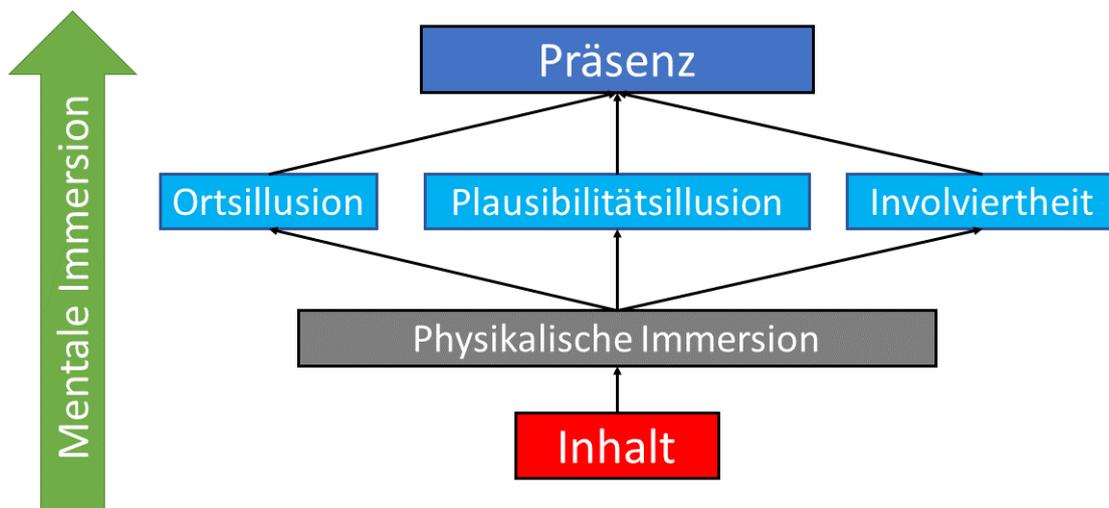


Abbildung 4: Immersion und Präsenz

3.2.2 Die Bedeutung von Haptik für die Psyche

Der Begriff „Haptik“ [307] geht auf den deutschen Psychologen Max Dessoir zurück, welcher diesen Begriff im Jahre 1892 für das Tastsinnessystem in Anlehnung zu den anderen Wahrnehmungskanälen der Akustik und Optik wählte. Wie zuvor in dem Unterkapitel 3.1.2 Taktile Wahrnehmung beschrieben, werden die haptischen Signale über spezifische Rezeptoren aufgenommen und an das Gehirn weitergeleitet. Die Wirkung dieser ankommenden Signale spielt in vielen Bereichen der Wahrnehmung eine wichtige Rolle, denn sie beeinflusst gemeinsam mit den anderen Wahrnehmungskanälen das Erleben einer Person.

In diesem Unterkapitel werden die wesentlichen Aspekte der Haptik in Bezug auf die menschliche Wahrnehmung behandelt. Die Haptik ist in vielen Bereichen des menschlichen Erlebens von großer Bedeutung, auch wenn diesem Wahrnehmungskanal oft nicht die gleiche Aufmerksamkeit wie dem visuellen oder akustischen Erleben gewidmet wird. Dies kann unter anderem den bisher fehlenden Möglichkeiten zugeschrieben werden, verlässlich haptische Empfindungen zu simulieren. Dabei beeinflussen sich diese Wahrnehmungssysteme gegenseitig [84]. Der Tastsinn ist dabei von großer Wichtigkeit und wird als erster Wahrnehmungskanal ausgebildet. Bereits in der achten Schwangerschaftswoche kann ein Fötus so seine Umgebung wahrnehmen [113, 212].

Haptik und Emotionale Bindung

Berührungen zwischen Menschen sind in der Gesellschaft von großer Bedeutung. Vom festen Griff beim Händeschütteln bis hin zu einer sanften Umarmung bei Freunden und Familie - all diese Berührungen tragen dazu bei, das Gegenüber einzuschätzen und seine Absichten zu erkennen. So kann aus einem schwachen Händedruck möglicherweise Schwäche bis hin zur Ablehnung des Gegenübers ausgelesen werden [127].

Ein Experiment des Psychologen Matthew Hertenstein [130] von der Universität DePauw zeigt auf, dass die taktilen Kanäle dazu genutzt werden können, Emotionen des Gegenübers zu erkennen. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, einem Fremden verschiedene Emotionen zu vermitteln, wobei dieser Person jedoch die Augen verbunden war. Obwohl demnach nur Berührungen genutzt werden konnten, um die Aufgabe zu erfüllen, gelang es in 70% der Fälle dem Fremden Gefühle wie Dankbarkeit, Ekel, Wut oder Liebe zu vermitteln. Darüber hinaus wurde bei der Studie festgestellt, dass Emotionen mit spezifischem Berührungsverhalten verknüpft scheinen.

Durch den menschlichen Tastsinn können nicht nur Emotionen versendet, sondern auch emotionale Bindungen geschaffen und gefestigt werden. Hormone wie Oxytocin können durch körperliche Nähe zwischen Menschen ausgeschüttet werden, was zu einer langfristigen Stabilisierung von Beziehungen beitragen kann [209]. Diese emotionalen Bindungen beschränken sich jedoch nicht nur auf den zwischenmenschlichen Kontakt [369]. Ein Beispiel dafür ist das flauschige Gefühl von der Lieblingsdecke oder die glatte Oberfläche eines Smartphone-Bildschirms. All diese Eigenschaften sind Dinge, zu denen Menschen eine emotionale Bindung aufbauen können.

Aus diesem Grund wurde Haptik ebenfalls als Möglichkeit der Depressionsbehandlung gesehen. Die Diplomarbeit *Liebevolle Berührung in der Depressionstherapie* von Ruth Zingerle [389] hat sich ausführlich mit dem Zusammenwirken von Berührungen und depressiven Verstimmungen beschäftigt. Zwar konnte die Arbeit nicht klären, ob der Mangel an physischen und emotionalen Berührungen zum Anstieg depressiver Verstimmungen führt, dennoch konnte gezeigt werden, dass psychotherapeutisches Potenzial in Behandlungen wie einer *Lomi Lomi Nui* Massage liegen können. Diese Ergebnisse wurden im Jahre 2018 noch einmal von Stötter et al. [316] gestützt. Auch hier wurden Massagen durchgeführt, welche signifikante Verbesserungen in den Bereichen Symptome, Bindungsdefizite und Achtsamkeit aufzeigten.

Haptik und Erinnerung*

Bis vor Kurzem ging die Wissenschaft davon aus, dass alle Sinneseindrücke, die konstant auf eine Person einwirken, zu einer Habituation, also zu einer Gewöhnung oder Abstumpfung gegenüber dem Reiz führen können. Die Bereitschaft, auf einen sich immer wiederholenden Stimulus zu reagieren, nimmt stetig ab. Somit handelt es sich um einen Gewöhnungsprozess, der dazu führen kann, dass störende Reize wie das Ticken einer Uhr stetig weniger wahrgenommen werden und die Reaktion darauf abnimmt.

Diese Lernprozesse beginnen bereits im frühen Säuglingsalter und reichen durch das gesamte Leben. Der Effekt der Habituation kann kurzzeitig anhalten, aber durch wiederholtes Auftreten des Reizes auch langfristig bestehen bleiben. Infolgedessen nimmt der synaptische Kontakt ab und die Information wird nicht dauerhaft im Gehirn gespeichert [263, 306].

Die Studie von Hutmacher und Kuhbandner [136, 296] aus dem Jahre 2018 zeigte jedoch, dass die Annahme der Habituation auf taktile Empfindungen nicht im gleichen Maße zutrifft wie auf die anderen Wahrnehmungskanäle. Die beiden Psychologen der Universität Regensburg führten ein Experiment mit 26 Probanden durch, welche ihre Augen verbunden hatten. Insgesamt wurden den Testpersonen 168 Objekte für jeweils zehn Sekunden zum ertasten präsentiert, darunter eine Schere, ein Ball oder ein Handschuh. Anschließend bekamen die Probanden den ertasteten Gegenstand sowie einen Weiteren der gleichen Kategorie, beispielsweise zwei unterschiedliche Tassen, die sich in der Dicke des Henkels unterschieden. Nachdem *Two-Alternative Forced Choice*-Testverfahren mussten die Versuchspersonen dann entscheiden, welchen der beiden Gegenstände sie zuvor bereits betastet hatten. Unmittelbar darauf wurden im Schnitt noch 80 von 84 Objekten, demnach über 90% richtig identifiziert.

Eine Woche später erhielten die Testpersonen erneut Gegenstände zum ertasten, von denen sie 79% der Objekte wiedererkannten, ohne zuvor angewiesen zu werden, sich diese einzuprägen. Hierbei war die haptische Wahrnehmung sogar verlässlicher als der visuelle Eindruck.

In einer dritten Testreihe wurden den Testpersonen die bereits bekannten Objekte zusammen mit einem bisher unbekanntem Objekt derselben Kategorie präsentiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der taktile Unterschied zwischen dem bekannten Objekt und seinem Gegenstück gering war. Etwas mehr als 70% wurden von den Versuchspersonen korrekt identifiziert. Diese Forschungsergebnisse legen nahe, dass solche detaillierten Reize dauerhafte Spuren im Langzeitgedächtnis hinterlassen und dass es hier nicht zu einer Gewöhnung kommt. Diese Erkenntnisse können im Bereich des Gedächtnisses enorm spannende Ansätze bieten, welche weiter erforscht werden müssen. Demnach kann Haptik auch beim Einprägen von konstanten Reizen hilfreich sein.

Haptik und Lernen*

Das Lernen ist ein wichtiger Aspekt im Leben und ermöglicht es Personen, neue Fähigkeiten und Wissen zu erlangen und dieses beizubehalten. Da jeder Mensch individuell stark seine Wahrnehmungskanäle zu nutzen scheint, gibt es verschiedene Theorien, die diese Aspekte aufschlüsseln.

Eine dieser Theorien, die Theorie der Lerntypen, geht auf Frederic Vester zurück, der in seinem Buch *Denken, Lernen, Vergessen* [356] einen Lernansatz vorstellte, bei dem unterschiedliche Wahrnehmungskanäle berücksichtigt werden. Nach Vester gibt es insgesamt vier unterschiedliche Lerntypen, die nach ihrer Gruppe differenziert auf ihre Sinneseindrücke zurückgreifen, wenn sie Informationen erfassen und verarbeiten müssen. Dabei ist die Lernart unabhängig von dem Schwierigkeitsgrad der Aufgabe, sondern hängt individuell von der Person ab [186]. Nach Vester gibt es den *auditiven Lerntyp*, welcher primär mit dem Gehör Informationen aufnimmt und den *visuellen Lerntyp*, der besser durch Lesen Informationen erfassen kann. Daneben gibt es den *intellektuellen Lerntyp*, welcher sich kritisch mit den Informationen auseinandersetzen muss und den *haptischen Lerntyp*, der seinen Tastsinn nutzt, um Informationen zu erfassen und um sich diese besser einprägen zu können. Denn auch beim Lernen ist die Haptik einer der wichtigsten Bestandteile und lässt sich in den meisten Lerntheorien wiederfinden.



Abbildung 5: Übersicht über die Lerntypen nach Vester

„Learning by Doing“ ist bei dem haptischen Lerntyp das Vorgehen. Menschen, die dem haptischen beziehungsweise dem motorischen Lerntyp angehören, lernen am besten, indem sie Handlungsabläufe selbst vollzogen haben oder ihren Tastsinn verwenden können, um ein Modell mit diesem zu untersuchen. So können sie sich viele gehaltvolle Merkmale einprägen und die Informationen schneller erfassen. Diesem Lernprinzip gehen alle Menschen bereits im Kindesalter nach. Jedoch gibt es im späteren Leben, gerade in theoretischen Lernbereichen, wenig Möglichkeit, die taktile Wahrnehmung zu verwenden. Aus diesem Grund wird daher zum Lernen empfohlen, die Abläufe, sofern dies möglich ist, konkret durchzugehen, Collagen zu basteln, viel zu schreiben oder auch die theoretischen Inhalte mit spezifischen Bewegungen zu verknüpfen [300, 335].

„Je mehr Arten der Erklärung angeboten werden, je mehr Kanäle der Wahrnehmung benutzt werden (...), desto fester wird das Wissen gespeichert, desto vielfältiger wird es verankert und auch verstanden, desto mehr Schüler werden den Wissensstoff begreifen und auch später wieder erinnern.“

Frederic Vester [356]

Wie das Zitat von Frederic Vester verdeutlicht, ist es sinnvoll, alle Kanäle beim Lernen zu berücksichtigen. Denn auch wenn die Lerntypen so beschrieben werden, greift jeder Mensch individuell auf seine Sinneseindrücke zurück und nutzt die Wahrnehmungskanäle unterschiedlich stark und in verschiedenen Kombinationen, um das optimale Lernergebnis für sich zu erzielen. Gerade die Haptik, die in unterschiedlicher Weise genutzt werden kann, ist hierbei genauso wichtig wie die anderen Wahrnehmungskanäle. Auch wenn sie in der Realität nur in spezifischen Anwendungsfällen nutzbar ist, so könnte durch eine Kombination mit der virtuellen Realität ein verbesserter Zugang zu Abläufen und Informationen geschaffen werden, welche dann auch greifbar und spürbar gemacht werden könnten. Unterschiedliche Studien [173, 388] konnten bereits zeigen, dass bei steigender Komplexität von virtuellen Aufgaben die Haptik den Lernprozess unterstützt und die benötigte Zeit, um eine Aufgabe zu bewältigen, reduzieren kann.

Haptische Täuschungen

„Wenn das Tasten nicht eine einzige Wahrnehmung, sondern eine Mehrzahl ist, sind auch seine Gegenstände eine Vielheit.“

Aristoteles [121]

Auch Aristoteles hat sich mit dem Thema der Haptik beschäftigt. Er stieß dabei auf ein interessantes Phänomen, die sogenannte aristotelische Täuschung [302]. Diese beschreibt, dass, wenn man zwei Finger übereinanderlegt und ein kleines Objekt dazwischen platziert, der Eindruck entsteht, als würde es sich dabei um zwei separate Gegenstände handeln. Sofern man nicht hinschaut, hält der Effekt an. Dies ist eine der sogenannten haptischen Täuschungen, die auch für haptische Geräte genutzt werden können. Insbesondere die *Cutaneous Rabbit* [33] ist eine dieser haptischen Täuschungen, die genutzt werden kann, um fließende Bewegungen durch nur zwei Druckpunkte zu simulieren. Hierbei werden Berührungen auf zwei verschiedene Stellen auf der Haut ausgeübt. Obwohl sonst keine Berührung stattfindet, werden von der Person weitere Berührungen in den Zwischenräumen wahrgenommen.

Auch werden Gegenstände mit mehr Volumen schwerer wahrgenommen als Objekte mit weniger Volumen, obwohl sie das gleiche Gewicht aufzeigen. Dies bezeichnet man auch als *Charpentiersche Täuschung* [303]. Dies sind alles wichtige Effekte, die bei technischen Limitationen dennoch dazu führen können, einen realistischen haptischen Eindruck zu vermitteln, der durch visuelle und akustische Reize in der virtuellen Realität zusätzlich gesteigert werden kann. Da durch die virtuelle Welt der Blick auf den wirklichen Reiz verdeckt bleibt, kann eine haptische Illusion dieser Art ohne Probleme aufrechterhalten werden.

3.2.3 Psychische Erkrankungen

Nach der Weltgesundheitsorganisation (WHO) [228] versteht man unter dem Begriff „psychische Gesundheit“ einen Zustand des Wohlbefindens, die eine Person dazu befähigt, ihre Fähigkeiten auszuschöpfen, produktiv zu arbeiten und einen Beitrag zur Gemeinschaft zu leisten. Insgesamt ist die normale Lebensbelastung zu bewältigen.

Sobald die psychische Gesundheit einer Person gestört ist und sie nicht mehr in der Lage ist, ihre normale Lebensbelastung zu bewältigen, spricht man von einer psychischen Erkrankung. Diese ist oft durch eine Kombination aus belastenden Gedanken, Emotionen, Verhaltensweisen und Beziehungen zu anderen gekennzeichnet [228].

Nach der *American Psychiatric Association* wird dies wie folgt definiert:

„Eine psychische Störung ist als Syndrom definiert, welches durch klinisch bedeutsame Störungen in den Kognitionen, der Emotionsregulation oder des Verhaltens einer Person charakterisiert ist. Diese Störungen sind Ausdruck von dysfunktionalen psychologischen, biologischen oder entwicklungsbezogenen Prozessen, die psychischen und seelischen Funktionen zugrunde liegen. Psychische Störungen sind typischerweise verbunden mit bedeutsamen Leiden oder Behinderung hinsichtlich sozialer oder berufs-/ausbildungsbezogener und anderer wichtiger Aktivitäten. Eine normativ erwartete und kulturell anerkannte Reaktion auf übliche Stressoren oder Verlust, wie z. B. der Tod einer geliebten Person, sollte nicht als psychische Störung angesehen werden. Sozial abweichende Verhaltensweisen (z. B. politischer, religiöser oder sexueller Art) und Konflikte zwischen Individuum und Gesellschaft sind keine psychischen Störungen, es sei denn, der Abweichung oder dem Konflikt liegt eine der oben genannten Dysfunktionen zugrunde.“ [85, 91]

Psychische Erkrankungen haben jedoch nicht nur schädlichen Einfluss auf das Leben der Betroffenen, sondern können zu einer Verkürzung der Lebenszeit um bis zu 20 Jahre führen [128, 174]. Diese Zahlen sind nicht auf spezifische Ursachen zurückzuführen, zeigen jedoch deutlich den Behandlungsbedarf auf. Dieser ist über die letzten Jahre deutlich angestiegen. Die DAK brachte 2020 einen Report über die Entwicklung psychischer Erkrankungen im Berufsalltag zwischen 2010 und 2020 heraus. Hier zeigt sich ein Anstieg der Fehltagelänge von um die 56% [55], hervorgerufen durch psychische Erkrankungen (siehe Abbildung 6).

Anstieg der Fehltage: Psychische Erkrankungen im Vergleich zu den Fehltagen insgesamt

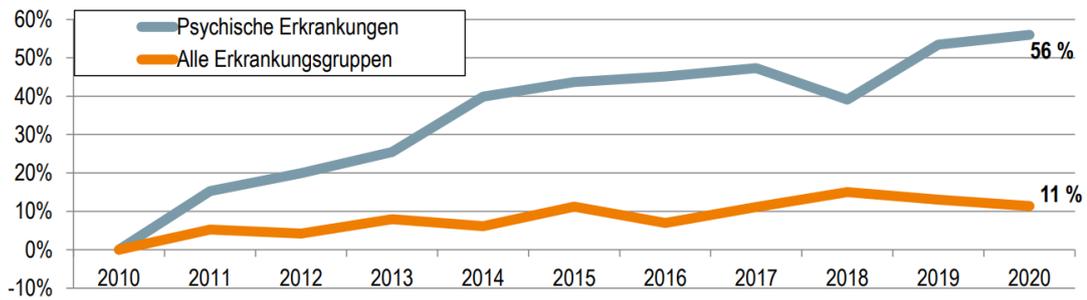
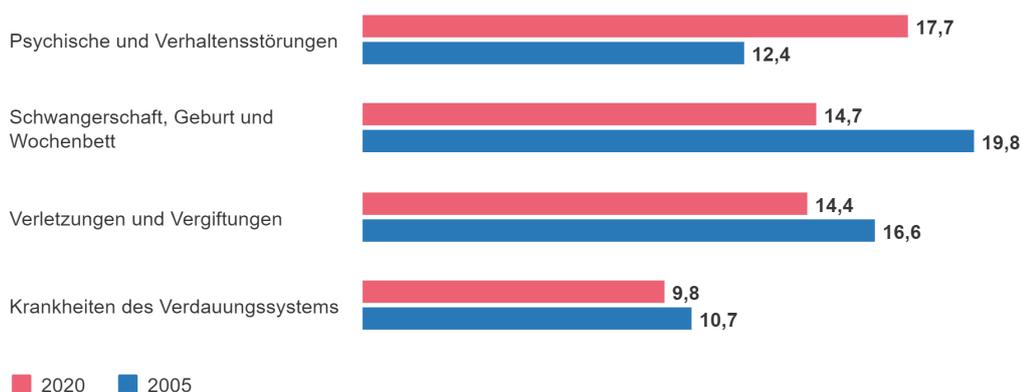


Abbildung 6: Anstieg der Fehltage aufgrund von psychischen Erkrankungen im Vergleich zu Fehltagen aller Erkrankungsgruppen [55]

Die Folgen psychischer Erkrankungen nehmen stetig zu, auch für junge Menschen. Im Jahre 2020 waren psychische Erkrankungen und Verhaltensstörungen die häufigste Ursache für junge Menschen, stationär in Krankenhäusern behandelt zu werden. 147.000 der 829.400 15- bis 24-Jährigen, also knapp 18% aller Krankenhausbehandlungen in dieser Altersstufe wurden aufgrund psychischer Probleme, insbesondere depressiver Episoden, unternommen. Hierbei ist ein deutlicher Anstieg zum Jahr 2005 zu erkennen, bei dem nur ca. 12% aller Behandlungen auf die Psyche zurückzuführen war [311].

Häufigste Diagnosen stationärer Krankenhausbehandlungen 15- bis 24-Jähriger

Anteil an allen Behandlungsfällen von 15- bis 24-Jährigen in %



© Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023

Abbildung 7: Häufigste Diagnose stationärer Krankenhausbehandlungen im Alter von 15-bis 24-Jahren © Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023 [311]

Häufig auftretende psychischen Erkrankungen

Es gibt eine Vielzahl von psychischen Erkrankungen, die Einfluss auf das alltägliche Leben der Betroffenen nehmen. Um sich einen Überblick über mögliche Therapiebereiche zu schaffen, ist es wichtig, einige der häufig auftretenden Erkrankungen zu kennen und die Hintergründe zu verstehen. Im Folgenden werden die häufigsten psychischen Störungen gemäß DEGS1-MH (Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland 1 -Psychische Gesundheit) [147, 148, 249], nach einer 12-Monatsdiagnose, mit einer kurzen Erläuterung aufgelistet und näher gebracht:

- **(F50.-) Essstörung:** Bulimia nervosa (Ess-Brech-Sucht), Anorexia nervosa (Magersucht) und Binge-Eating-Störungen (Essanfälle ohne Gewichtsregulierung) sind schwere Erkrankungen, die sich durch eine Störung des Denkens über Essen auszeichnen und zu einem gestörten Essverhalten führen. Der Fokus der Betroffenen liegt in erster Linie auf dem Essen und ihrem Gewicht. So reduzieren Betroffene von Anorexia nervosa ihre Nahrungsaufnahme und beabsichtigen einen Gewichtsverlust oder dessen Aufrechterhaltung. Bulimia nervosa Erkrankte hingegen stoßen die Nahrung nach wiederholten Anfällen von Heißhunger wieder ab. Dies führt zu Essanfällen und Erbrechen als Verhaltensmuster. Binge-Eater können nicht kontrollieren, wie viel sie essen, wodurch sie phasenweise viel mehr Nahrung aufnehmen als sie eigentlich wollen. Sie werden nach IDC-10 als atypische Bulimia nervosa klassifiziert. Alle diese Verhaltensweisen können zu Schädigungen des Körpers bis hin zum Tode führen [34, 66, 193, 241].
- **(F43.1) Posttraumatische Belastungsstörung:** Diese Störung kann als verzögerte Reaktion auf ein belastendes oder traumatisches Ereignis entstehen. Diese Erlebnisse zeichnen sich meist durch eine außergewöhnliche Bedrohung oder ein katastrophenartiges Ausmaß für die Betroffenen aus, die tiefe Verzweiflung hervorrufen. Bei Patienten können durch sogenannte „Trigger“ intensive Flashbacks, Gefühle oder Albträume ausgelöst werden, die mit den Erfahrungen in Zusammenhang stehen und zu einem Wiedererleben der Situation führen. Betroffene leiden unter verschiedensten Symptomen wie Schlaflosigkeit, Depressionen, Teilnahmslosigkeit bis zu Persönlichkeitsänderung [65, 193, 273].
- **(F23.-) Psychotische Störung:** Sind eine heterogene Gruppe an Störungen, die sich durch zwei Hauptsymptome auszeichnen. Einmal Halluzinationen, also das Hören, Sehen oder auch Riechen, Fühlen und Schmecken von Dingen, die nicht

außerhalb des Verstands der betroffenen Personen existieren, sowie Wahnvorstellungen. Hierbei sind betroffene Personen stark von Dingen überzeugt, welche von der Allgemeinheit nicht geteilt werden, beispielsweise Verschwörungstheorien. Häufig gehen diese Symptome mit einer schweren Störung des normalen Verhaltens einher. Diese Symptome können durch Krankheitsbilder wie Schizophrenie ausgelöst werden, aber auch durch Stress, ein Trauma oder Drogenmissbrauch [62, 193, 217].

- **(F45.-) Somatoforme Störungen:** Betroffene einer somatoforme Störung haben körperliche Beschwerden, die keine genaue Ursache haben. So fordern Betroffene trotz negativer Untersuchungsergebnisse wiederholte medizinische Unterstützung an. Diese Symptomatik kann hypochondrischer Natur sein, also dem Glauben einer Person, unter spezifischen Krankheiten zu leiden und sich dies einzureden, aber auch undifferenzierbar sein. Jedoch verlaufen diese Störungen meist chronisch [68].
- **(F42.-) Zwangsstörung:** Diese zeichnet sich durch wiederkehrende zwanghafte Handlungen und Gedanken aus, die sich stetig wiederholen und die Betroffenen in diesem Zyklus gefangen halten. Trotz des Versuchs, sich diesem Ablauf zu entziehen, schaffen es die Betroffenen nicht, Widerstand zu leisten, was in intensiver Angst und einem Leidensdruck münden kann [61, 193].
- **(F10-F19) Substanzabhängigkeit:** Auch „Sucht“ genannt, beschreibt das starke Verlangen von Betroffenen, bestimmte Substanzen zu konsumieren. Hierbei verlieren abhängige Personen jegliche Kontrolle hinsichtlich des Substanzkonsums und sind nicht mehr in der Lage, diesen zu unterbinden. Das Suchtmittel wird zentraler Mittelpunkt des Lebens, wodurch es zu Einschränkungen im sozialen, schulischen oder beruflichen Bereich kommen kann. Häufig kommt es auch zu einer Steigerung des Konsums, da die Betroffenen eine körperliche Toleranz entwickeln, dennoch aber den gleichen Effekt erzielen möchten. Aus diesem Grund kommt es auch beim Konsumverzicht dann zu Symptomaten [67, 229, 241].
- **(F31.-) Bipolare affektive Störung:** Ist eine Stimmungsstörung, die durch mindestens zwei unterschiedlichen Stimmungsepisoden charakterisiert wird. Betroffene schwanken permanent zwischen häufig sehr positiven (manischen) und sehr negativen (depressiven) Stimmungen. Da diese Schwankungen zwischen den Extremen sehr schwerwiegend und unberechenbar sind, beeinflussen sie die berufliche und schulische Leistung und können auch die Beziehungen zu den Mitmenschen beeinträchtigen [63, 193, 216, 241].

- **(F40.-) Angststörung:** Umfasst eine ganze Gruppe an Störungen, die sich ausschließlich oder überwiegend über ein übersteigertes Angstepfinden auszeichnen. Die Ängste wirken sich hierbei auf das alltägliche Leben aus und schränken die Betroffenen häufig in ihrer Funktionsfähigkeit ein. So werden häufig von den Personen Vermeidungsstrategien entwickelt, um den angstauslösenden Reizen zu entgehen [64, 69, 193, 241].

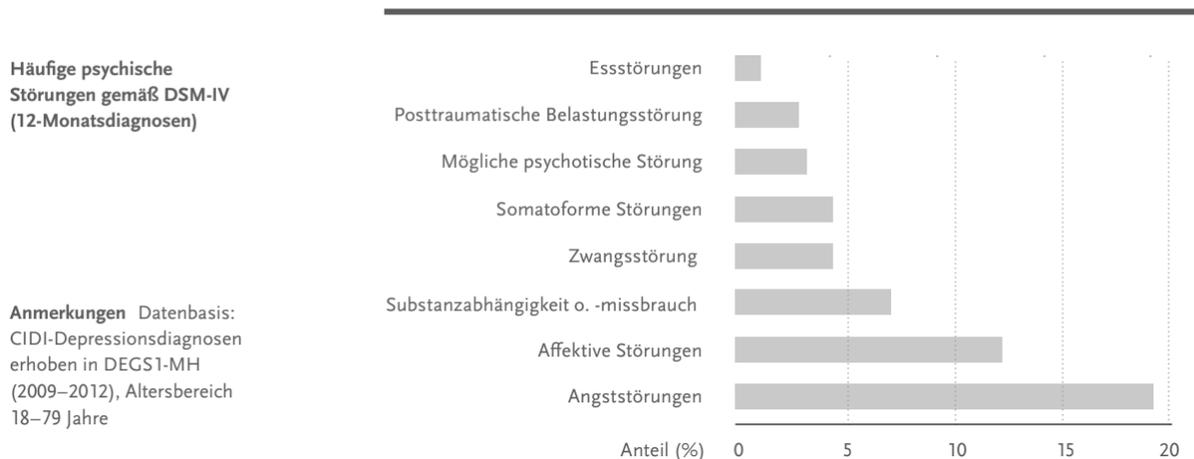


Abbildung 8: Häufige psychische Störungen gemäß DSM-IV (12-Monatsdiagnosen) nach RKI und ihr Anteil in Prozent [249]

3.2.4 Psychotherapie

„Nach Strotzka (1984) ist Psychotherapie „eine Interaktion zwischen einem oder mehreren Patienten und einem oder mehreren Therapeuten (aufgrund einer standardisierten Ausbildung), zum Zwecke der Behandlung von Verhaltensstörungen oder Leidenszuständen (vorwiegend psychosozialer Verursachung) mit psychologischen Mitteln (durch Kommunikation, vorwiegend verbal oder auch a verbal), mit einer lehrbaren Technik, einem definierten Ziel und auf der Basis einer Theorie des normalen und abnormen Verhaltens.“

- Zitat aus dem Buch *Psychiatrie und Psychotherapie* [60]

Arten von Therapien

Psychotherapien sind der Standard bei der Behandlung von psychischen Störungen, jedoch gibt es keine eindeutige Behandlungsmethode. Stattdessen gibt es verschiedene Arten der Psychotherapie, die ein unterschiedliches Verständnis von der Entstehung psychischer Krankheiten besitzen und demnach andere Therapiekonzepte verfolgen. Im Folgenden werden einige der gängigsten Therapieansätze aufgelistet. Zu beachten ist, dass es viele weitere Facetten gibt, sich die Therapiemethodik über die Jahre stetig weiter entwickelt und sie ebenfalls ergänzend zueinander fungieren können [376]:

- **Verhaltenstherapie:** Umfasst mittlerweile die klassische und kognitive Verhaltenstherapie, bei der das gemeinsame Erarbeiten von neuen Verhaltens- und Erlebensmustern mit dem Patienten im Vordergrund steht. Basierend auf dem Grundgedanken, dass Menschen sich Verhalten über das Leben hinweg aneignen und verlernen können, werden diese negativen Muster durch positive ersetzt. Zusätzlich werden Kognitionen, Motive, Emotionen sowie der soziale Kontext in die Therapie mit einbezogen. Ein bekannter Ansatz ist die Expositionstherapie, wobei eine Konfrontation durchgeführt wird, um die Beschwerden schrittweise zu lindern [103, 242, 310].
- **Tiefenpsychologisch fundierte Psychotherapie:** Ist eine Sammelbezeichnung für Therapieverfahren nach Freud, Jung und Adler. Sie befasst sich mit unterbewussten Prozessen und versucht, die Ursachen für psychische Erkrankungen in aktuellen Konflikten des Patienten zu finden. Dazu werden spezielle Gesprächstechniken verwendet, welche die bestehenden Beschwerden und Probleme der Betroffenen herausarbeiten. Die Anzahl der Therapiesitzungen ist hierbei recht gering und sie beziehen sich nur auf die aktuelle Problematik. Ziel ist es, aus den zentralen Konflikten Veränderungen für die Gegenwart anzustoßen [242, 309, 377].
- **Gesprächspsychotherapie nach Rogers:** Dieser humanistische Therapieansatz, bei dem der Mensch als Ganzes im Fokus steht, befasst sich mit dem Gedanken, dass Menschen stets danach streben, sich weiterzuentwickeln. Ziel ist es, dass der Patient Unstimmigkeiten in seinen Gedanken und Emotionen überkommt und lernt, sich selbst zu akzeptieren. Häufig spricht man davon, dass das Selbst der Person gespalten ist und die eigenen Emotionen und Gedanken des Betroffenen nicht zu dem eigenen Selbstbild passen. Häufig auch zurückzuführen auf die kindliche Entwicklung, in welcher nur ein spezifisches Selbstbild Wertschätzung erhält. Hierbei spielt auch die Beziehung zum Therapeuten eine wichtige Rolle [233, 242, 304].

- **Gestalttherapie:** Diese ebenfalls humanistische Therapieart soll Betroffenen dabei unterstützen, wieder zum Leben aufzuschließen. Dazu wird den Betroffenen mit verschiedenen Methoden deutlich gemacht, welche Gefühle und auffälligen Erlebens- und Verhaltensweisen für ihr Leben und die Beziehungen zu Mitmenschen hinderlich sind. Ziel ist es, bisher blockierte oder abgewehrte Bedürfnisse und Gefühle zuzulassen, um Lösungen einzuüben. Durch beispielsweise Rollenspiele wird dann der eigene Antrieb für Problemlösestrategien gestärkt. Die Aufgabe des Therapeuten ist hier die Begleitung und Unterstützung [233, 242, 305].
- **Systemische Therapie:** Wie der Name impliziert, wird hier der Grund einer psychischen Erkrankung als Destabilisierung des gesamten Lebensumfelds verstanden. Hier steht nicht nur der einzelne Patient im Fokus, sondern seine Lebensbedingungen, das soziale System oder die Herkunft. Oft werden hier auch weitere Personen des sozialen Umfelds in die Therapie mit einbezogen und gemeinsam konkrete Lösungsvorschläge erarbeitet. Kommunikation hat einen besonderen Stellenwert bei dieser Therapieform und wird über Gruppentherapien wie beispielsweise Paartherapien oder Familientherapien organisiert, die die Mehrgruppensystematik herausarbeitet, um das aktuelle System zu beobachten. So können gemeinsame Lösungskonzepte entwickelt werden, die problematische Strukturen aushebeln und eine Lösung des Problems für alle Beteiligten ermöglicht [242, 276, 308].

Durch den Beschluss des gemeinsamen Bundesausschusses (G-BA-Beschluss) [129] vom 22. November 2019 wurde die systemische Therapie ebenfalls als notwendiges Psychotherapieverfahren anerkannt und kann nun zulasten der gesetzlichen Krankenversicherung erbracht werden. So zählt sie seit einigen Jahren zu den drei bisherigen Therapieverfahren, die bereits von der Krankenkasse übernommen wurde. Dies waren bisher nur die tiefenpsychologisch fundierte Psychotherapie, die analytische Psychotherapie und die Verhaltenstherapie. Dies zeigt, dass sich die Kultur der Psychotherapie weiter verändert und allgemeiner in der Gesellschaft anerkannt wird. Zudem haben so mehr Menschen Zugriff auf andere Therapieformen wie Paartherapien oder Familientherapien, die vorher nur aus eigener Kraft bezahlt werden konnten und demnach Menschen mit weniger Einkommen verwehrt waren. Humanistische Therapieansätze werden jedoch noch nicht allgemein von Krankenkassen übernommen.

3.2.5 Kognitive Leistungsfähigkeit

Neben den allgemeinen Therapien ist auch der Erhalt der kognitiven Fähigkeiten entscheidend. Kognitive Fähigkeiten wie die Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Gedächtnisleistung, Lern- und Problemlösefähigkeit, Umstellfähigkeit, exekutive Funktionen und kognitive Flexibilität sind von grundlegender Bedeutung für eine unabhängige Lebensführung und eine aktive Teilhabe in der Gesellschaft [9]. Daher sind diese Fähigkeiten relevant für jede Altersklasse und müssen unter allen Umständen aufrechterhalten werden.

Über die Lebensspanne hinweg zeigt sich, dass die kognitiven Mechaniken über die Lebensjahre deutlich abnehmen, wobei eine Studie [165] bereits feststellen konnten, dass das Gedächtnis ein Leben lang plastisch bleibt und sich durch Training der Fähigkeiten die Synapsen weiter und neu verknüpfen können.

Jedoch nehmen die Fähigkeiten nicht nur durch fehlendes Training ab, sondern können auch durch psychische Probleme beeinträchtigt werden. Eine gute kognitive Leistungsfähigkeit kann dazu beitragen, dass eine Person besser in der Lage ist, Stress zu bewältigen, emotionale Stabilität zu erreichen und ein gesundes soziales Leben zu führen, wodurch die Gefahr einer Erkrankung an einer psychischen Störung reduziert sein kann. Gleichzeitig können psychische Erkrankungen wie Depressionen, Angstzustände oder Schizophrenie die kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Die Fähigkeit, sich zu konzentrieren, Informationen zu verarbeiten oder gar Entscheidungen zu treffen, ist für Menschen mit psychischen Störungen oft schwierig und kann zu einem erhöhten Leidensdruck führen. Gerade Menschen mit chronischem Stress zählen als Risikogruppe, bei der sich frühzeitig Verschlechterungen der kognitiven Leistungen feststellen lassen [249].

In einem Schwerpunktbericht zu Depressionen und kognitiver Leistungsfähigkeit des Robert-Koch-Instituts (RKI) [249] wurden Einzelergebnisse aus dem Gesundheitsmonitoring des RKI zusammengetragen. Hierbei konnte zwar festgestellt werden, dass die kognitiven Fähigkeiten im Zusammenhang mit einer Depression nur in einem geringen Umfang beeinträchtigt sind, subjektiv diese Gedächtnisverschlechterung jedoch viel größer wahrgenommen wird und demnach die Sorge der Betroffenen gesteigert wird. Demnach ist der Erhalt und das Training der kognitiven Fähigkeiten ein relevanter Aspekt der psychischen Gesundheit und sollte neben den allgemein üblichen Therapien berücksichtigt werden.

3.3 Technische Grundlagen

Neben den bereits besprochenen biologischen und psychologischen Grundlagen wird in diesem Abschnitt die technische Seite genauer beleuchtet. Die virtuelle und die erweiterte Realität sind zwei neue technische Ansätze, welche es in der heutigen Zeit ermöglichen, innovative Lösungen und Unterstützung in Bezug auf die Psychotherapie zu konzipieren. Die teils kostengünstigere und einfachere Umsetzung dieser Therapieansätze erlaubt darüber hinaus Herangehensweisen, welche in der Realität so nicht umsetzbar sind. Ein Beispiel hierfür wäre eine virtuelle Anwendung zur Therapie von Arachnophobie, der Angst vor Spinnen. Virtuelle Umgebungen ermöglichen die Kontrolle der Modellspinne und es können die Spinnenrasse, Größe oder das Verhalten mit einem Knopfdruck variiert werden. So kann ohne zusätzlichen Zeit- oder Kostenaufwand die Anwendung auf die Bedürfnisse und Ängste des Probanden abgestimmt werden, wovon Patienten wie Therapeuten profitieren können.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der virtuellen und erweiterten Realität kurz erläutert. Dabei wird zunächst auf die geschichtliche Entwicklung eingegangen, die bei beiden Systemen den gleichen Ursprung hatte. Anschließend werden die Merkmale und Darstellungsarten beider Techniken beleuchtet, um ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der virtuellen Realität, da diese insbesondere von Effekten wie der Immersion und Präsenz profitiert und viele der bisher erstellten Forschungsarbeiten im Therapiebereich die VR adressieren. Dennoch ist es wichtig, beide Techniken zu kennen, um die Forschung in diesem Bereich besser zu verstehen.

Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer kurzen Erläuterung der genutzten Werkzeuge und Programme, die für die Umsetzung oder Erweiterung einer VR-Anwendung benötigt werden. In diesem Fall sind insbesondere die Programme *Unity*¹ und *Blender* zu nennen, die auch im Folgenden für die Entwicklung von psychotherapeutischen Anwendungen eine Rolle gespielt haben. Zusätzlich bieten die meisten Entwickler von haptischer Technik eine Schnittstelle zu *Unity*, weshalb diese Game-Engine einen besonderen Stellenwert für die Konzeption eigener Anwendungen einnahm.

¹Firmennamen werden zur einfacheren Lesbarkeit ab diesem Zeitpunkt kursiv geschrieben.

3.3.1 Grundlagen der Virtual Reality

Virtual Reality umfasst die Idee einer computergenerierten Realität, welche mithilfe von spezieller Hard- und Software erzeugt und durch visuelle, auditive und haptische Eindrücke erlebbar gemacht wird. Physikalisch realistisch wirkende Interaktionen können in dieser virtuellen Welt ausgeführt werden, wodurch das Gefühl einer wirklich existierenden „Realität“ geschaffen wird.

Eine einheitliche Definition dieser noch recht neuen Technologie existiert im wissenschaftlichen Kontext jedoch nicht. Dennoch hat die Technik aus der Gaming-Industrie bereits einen festen Platz im Bereich des Trainings und der Therapie eingenommen, was im späteren Kapitel 4 noch einmal im Detail aufgegriffen wird. Trotz einer fehlenden Definition gibt es wünschenswerte Merkmale, die eine VR-Anwendung mitbringen sollte und wodurch sie sich als solche klassifizieren lässt [354]:

- Multimodale Präsentation der virtuellen Welt: Zeitgleiches Simulieren mehrerer Sinnesmodalitäten
- 3D-Interaktionen wie Körperbewegungen, Hand-, Kopf- und Körpergestik können abgebildet werden
- Echtzeitinteraktion
- Erzeugung von Immersion

Darstellung der virtuellen Realität

Um den visuellen Eindruck einer virtuellen Realität zu erzeugen, wird neben einer spezifischen Anwendung auch eine repräsentative Hardware benötigt. Diesbezüglich gibt es verschiedene Ansätze. Eine Möglichkeit sind die sogenannten *Cave Automatic Virtual Enviroments*, kurz *CAVEs*. Dies sind spezielle Räume mit Großleinwänden, auf welche die Bilder des virtuellen Raumes projiziert werden. So kann ein Durchschreiten der virtuellen Welt ermöglicht werden. Diese Räume sind jedoch recht kostenintensiv und können nicht ohne Weiteres transportiert und präsentiert werden [240].

Daher wurde im Jahre 2012 das erste Head-Mounted Display (HMD) von dem Unternehmen *Oculus* entwickelt [385]. Dies sind Brillen mit zwei Bildschirmen, welche für eine dreidimensionale Darstellung der virtuellen Welt sorgen. Die HMDs gelten mittlerweile

als am weitesten verbreitete Möglichkeit der Darstellung virtueller Realitäten. Die Idee dieser Technik stammt bereits aus dem Jahre 1965 [146] von Ivan Sutherland, der in seinem Buch *A Head-Mounted-Three Dimensional Display* [145] das „Sword of Damocles“ vorstellte, welches als erstes HMD gilt.

Heutzutage können auch die meisten Smartphones als HMD genutzt werden. Hierbei werden die Bilder für jedes Auge auf dem Bildschirm des Smartphones dargestellt. Um sich dieses dann wie bei einer konventionellen VR-Brille anzeigen zu lassen, kann beispielsweise das *Google Cardboard* [115] genutzt werden, eine Hülle von *Google*, die extra dafür entwickelt wurde, das Smartphone wie eine Brille am Kopf zu tragen. Dies separiert die beiden dargestellten Bilder für jedes Auge, für eine stereoskopische Ansicht.

Interaktion als Merkmal der virtuellen Realität

Auch die Interaktionsmöglichkeiten können ein Merkmal für eine VR-Anwendung sein. 3D-Interaktionen wie Körperbewegungen, Hand-, Kopf- und Körpergestik sind in den meisten Anwendungen ohne VR nicht möglich. Insbesondere das Interagieren mit räumlich versetzten virtuellen Objekten ist außerhalb der virtuellen Realität eher selten. Um dies zu ermöglichen, gibt es eine Vielzahl an Steuereinheiten und Techniken wie beispielsweise Controller, Datenhandschuhe oder Tracker, welche die Position und Interaktion präzise steuern können. Aber auch die Nutzung spezieller Infrarotkameras wie der Leap Motion [346] ermöglicht es, reale Handbewegungen in eine Anwendung zu übertragen und diese räumlich passend darzustellen. Aktuell wird zudem von vielen Unternehmen an verbesserten Alternativen gearbeitet, die ebenfalls Haptik mit einbeziehen. Darunter Anzüge und Westen, erweiterte Controllermöglichkeiten, aber auch Aufsätze für das HMD. Datenhandschuhe stehen hier besonders im Fokus. Sie ermöglichen präzises Handtracking und Gestenerkennung und können darüber hinaus mit Haptik wie Vibration oder einem Force Feedback erweitert werden. Im späteren Kapitel 4.4.1 „Haptische Handschuhe“ werden die aktuellsten Modelle vorgestellt und ihre Funktionalität herausgearbeitet.

Anzumerken ist hierbei, dass die zuvor benannten Interaktionsmöglichkeiten meist nur in Verbindung mit einem HMD genutzt werden können. Daher sind sie mit einer *CAVE* oder einem Smartphone derzeit nicht kompatibel. Demnach sind virtuelle Anwendungen mit einer Variation von haptischen Elementen derzeit nur spezifischen Head-Mounted Displays vorbehalten. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit rein auf die Integration von haptischer Hardware in Kombination mit einem HMD gesetzt. Hierbei wurde sich für die *HTC VIVE Pro* [135], entschieden, da diese die verwendeten Anwendungen und Programme unterstützt.

3.3.2 Grundlagen der Augmented Reality

Unter dem Begriff „Augmented Reality“ [239] wird eine Erweiterung der realen Welt durch virtuelle Aspekte verstanden. Durch integrierte Kameras können virtuelle Informationen oder Objekte in das Blickfeld des Nutzers projiziert und in die reale Welt integriert werden. Hierbei kann es sich um Texte, Abbildungen oder ganze 3D-Objekte handeln, welche dem Nutzer durch die meist portablen Geräte ins Blickfeld geblendet werden. Diesbezüglich sind die Anwendungsbereiche sehr vielfältig. Sie reichen vom Gamingbereich bis hin zu medizinischen und psychologischen Anwendungsfällen, von denen einige im Kapitel 4.3 „VR/AR Therapieansätze“ vorgestellt werden.

Darstellungsarten von Augmented Reality

Um die virtuellen Ergänzungen im Sichtfeld des Nutzers zu realisieren, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Die gängigste und kostengünstigste Methode ist die Nutzung von Smartphones. Hierbei wird die Realität von der Frontkamera des Smartphones erfasst und durch virtuelle Elemente ergänzt, die dann auf dem Smartphonebildschirm in Gänze dem Nutzer präsentiert werden. Ein Videospiel, das dadurch große Berühmtheit erlangte, war das Spiel *POKEMON GO* [337]. In diesem können Spieler Jagd auf virtuelle Monster machen, die auf dem Smartphonebildschirm in die Realität projiziert werden. Neben dem großen Erfolg sorgte die Anwendung dafür, dass sich die Idee der Augmented Reality in der Gesellschaft verbreitete [239].

Die alternative Darstellungsmethode hat den gleichen Ursprung wie die VR-HMDs. Auch die AR-Brillen wurde von dem „Sword of Damocles“ von Ivan Sutherland [145] inspiriert. Die erste namhafte AR-Brille, welche auf dem Markt erschien, war die HoloLens 1 [231] von *Microsoft* im Jahre 2016 [29]. Mittlerweile gibt es bereits eine weitere Generation mit der HoloLens 2 [200]. Gefolgt wurde die HoloLens 1 von der Magic Leap [172] im Jahre 2018, wobei die Entwicklerfirma mit wirtschaftlichen Problemen zu kämpfen hatte [14]. Mittlerweile ist seit September 2022 der Nachfolger, die Magic Leap 2 [13] auf dem Markt. Beide Brillen ermöglichen die Ergänzung des Sichtfelds durch virtuelle Objekte. Dazu wird anders als beim Smartphone nicht ein Video mit den ergänzenden virtuellen Modellen erzeugt, sondern über das Visier die virtuellen Objekte direkt in das Sichtfeld des Nutzers eingeblendet.

3.3.3 Vorstellung der verwendeten Entwicklungsumgebung: *Unity**

Die Softwareentwicklung beginnt in den meisten Fällen mit der Wahl einer Entwicklungsumgebung und der damit einhergehenden Programmiersprache.

Eine Entwicklungsumgebung (IDE) stellt hierbei Werkzeuge für die Softwareentwicklung bereit, die es dem Programmierer erleichtern, notwendige oder wiederkehrende Funktionen leichter zu nutzen. Dabei beinhaltet sie oft einen Code-Editor, einen Compiler, einen Interpreter und einen Debugger [189].

Im Jahre 2005 erschien die Laufzeit- und Entwicklungsumgebung zur Erstellung von interaktiven Medien wie Videospielen mit dem Namen *Unity*. Sie ist eine der ersten sogenannten Spiel-Engines und wurde von dem Unternehmen *Unity Technologies* für Zielplattformen wie den PC, Spielekonsolen und mobile Geräte sowie dem Webbrowser entwickelt. Dazu wird die Entwicklungsumgebung für 2D- und 3D-Anwendungen von den Betriebssystemen *Windows*, *Linux* und *macOS* unterstützt. Die Inspiration für die Entwicklungsumgebung stammt von *Final Cut Pro* von *Apple* und verwendet die Ideen eines wenig komplexen Workflows, einer selbsterklärenden Asset-Pipeline und der Drag-and-drop-Oberfläche für ihre eigene Entwicklungsumgebung [155, 323]. Neben der Spieleentwicklung wird die Engine oft im Bereich der Industrie verwendet, darunter für Filme, Architektur und den Bau von Automobilen [352].

Unity eignet sich besonders gut für die Entwicklung von VR-Anwendungen, da bereits die benötigten Werkzeuge für die Erstellung bereitgestellt werden. Die Entwicklungsumgebung bietet zum einen Renderingmethoden, die das Bild auf die zwei Monitore des HMD [324] projizieren und stellt zum anderen alle benötigten Funktionalitäten der Spieleentwicklung bereit. Darunter die notwendigen Werkzeuge zum Einbinden von Modellen, Zugriffe auf Physik- und Soundsysteme sowie dem Code, welcher zur Steuerung der Anwendung benötigt wird. Viele der VR- und AR-spezifischen Einbindungen werden ebenfalls von *Unity* unterstützt. Beispielsweise *SteamVR* [312] und das *Oculus Integration Package* [223] für VR-Anwendungen sowie die *Lumin SDK* [108] für AR-Anwendungen oder auch das *Mixed Reality-Toolkit* [244], welches die Entwicklung beider Anwendungsarten ermöglicht. Aus diesem Grund gilt *Unity* als eine der derzeit meist verwendeten Entwicklungsumgebungen für VR- und AR-Anwendungen. Folglich sind auch die Schnittstellen der derzeit erscheinenden haptischen Hardware häufig für *Unity* optimiert.

Aus diesen genannten Gründen wurde *Unity* für die Entwicklung der hier vorgestellten therapeutischen Anwendungen genutzt.

Benutzeroberfläche in Unity

Um die Benutzerfreundlichkeit der Entwicklungsumgebung *Unity* zu erhöhen, wurde die Benutzeroberfläche stark an gängige 3D-Animationsprogramme angelehnt. Nach dem Start der Engine öffnet sich eine Oberfläche, die aus insgesamt vier Bereichen besteht, die in der folgenden Abbildung 9 farblich markiert wurden zur besseren Veranschaulichung.

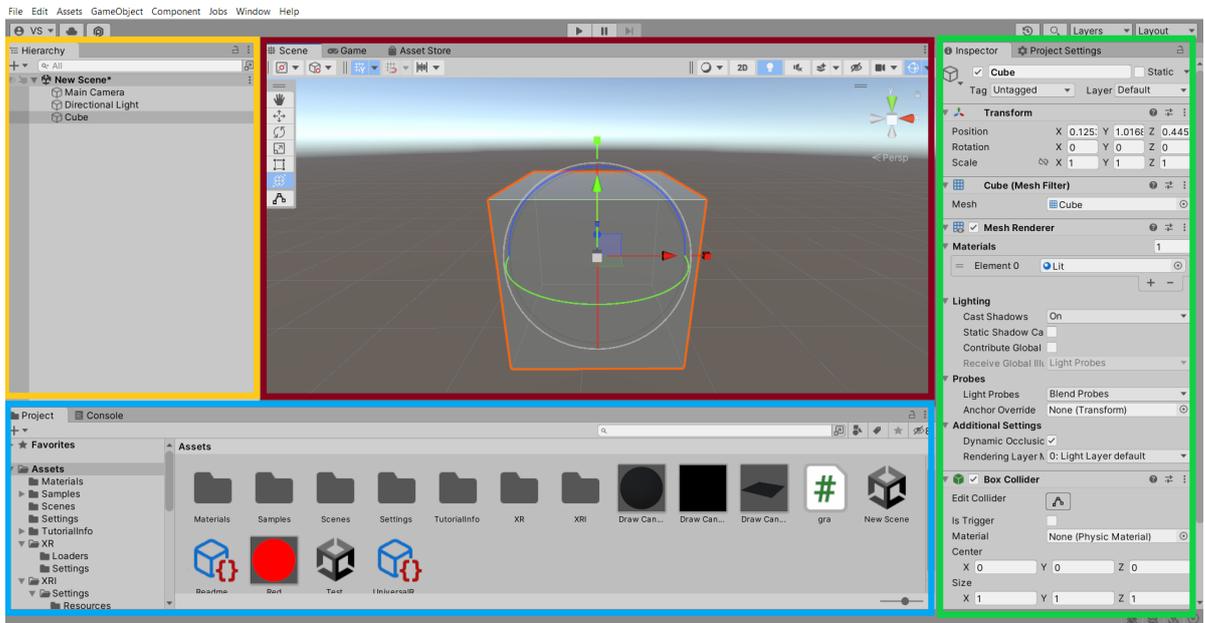


Abbildung 9: Die Benutzeroberfläche von *Unity* mit farblichen Markierungen

1. Project Das untere Fenster mit dem Namen *Project*, welches in der Abbildung 9 blau markiert wurde, zeigt den Projektordner und die genutzten Assets, also Bausteine wie Modelle, Codeskripte und vieles mehr, die für die Entwicklung einer Anwendung benötigt werden. Alle externen Assets können per Drag-and-drop in das Fenster gezogen und damit in *Unity* integriert werden. Zusätzlich bietet das *Project*-Fenster die Möglichkeit, eigene Elemente zu erstellen. Einige wichtige Elemente sind folgende:

- **Skript:** Enthält Programmiercode in *C#*
- **Modell:** 3D-Objekt und seine Darstellung
- **Material:** Enthält Informationen über Oberflächendetails, bspw. Farbe und Textur
- **Animation:** Festgelegte Bewegungsabläufe und Muster
- **Szene:** Enthält die Spielelemente und stellt eine Umgebung der Anwendung dar

2. Hierarchy Das linke Fenster, die *Hierarchy* [325], die in der Abbildung 9 gelb markiert ist, zeigt alle Objekte, die sich in der aktuellen Szene befinden, darunter Modelle, Kameras, Lichtquellen und sogenannte Prefabs [326]. Prefabs beinhalten eine Reihe von Modellen, Komponenten und Eigenschaften, die zu einem wiederverwendbaren Asset zusammengestellt und gespeichert wurden.

Objekte können über die *Hierarchy* in einer Eltern-Kind-Beziehung gruppiert werden. Unterobjekte/Kinder übernehmen dadurch anschließend die Verschiebung, Skalierung und auch die Transformation des Elternobjektes. Diese Verschachtlung kann über beliebig viele Ebenen fortgeführt werden.

Um neue Objekte zu erstellen, können sie entweder aus dem Projektordner in Form von Modellen direkt per Drag-and-drop in das *Hierarchy*-Fenster gezogen oder durch einen Rechtsklick in das *Hierarchy*-Fenster neu erstellt werden. Hier kann zwischen einem leeren Objekt, 3D- und 2D-Grundformen sowie Effekten, Licht, Audio, Video, Kamera und UI-Elementen ausgewählt werden.

3. Scene Das mittlere Fenster, die *Scene* [330], zeigt die aktuelle Szene. Sie wurde in der Abbildung 9 rot markiert. Hier können alle Elemente in der Szene gesehen und durch Anklicken mit der linken Maustaste ausgewählt werden. Dadurch ist es möglich, sie durch verschiedene Werkzeuge in Größe, Rotation und Position neu anzuordnen. Mit dem Mausrad und der rechten Maustaste kann durch die Szene navigiert werden.

Ebenfalls befindet sich in dem Fenster ein weiterer Tab für das *Game*-Fenster [328]. Dies zeigt die Anwendung aus der Sicht der gewählten Hauptkamera, z. B. die VR-Sicht des Nutzers.

4. Inspector Der *Inspector* [329], in Abbildung 9 grün markiert, zeigt die Eigenschaften des derzeit ausgewählten Elements der Szene an. Jedes Element besitzt ein sogenanntes *Transform*-Skript, welches die Position, Rotation und Skalierung des Elementes im Raum angibt. Die Werte können ebenfalls hier geändert werden, sofern man nicht die Werkzeuge in der Szene verwenden möchte. Neben diesem Standardelement können weitere Elemente hinzugefügt werden, welche für die Funktionalitäten sorgen. So ist es möglich, hier beispielsweise Materialien, Kollisionsverhalten und Audioquellen zu den Elementen hinzuzufügen oder eigene Codeskripte zu erstellen.

Zusätzliche wichtige Komponenten in *Unity*

Rigidbody Der *Rigidbody* [331] ist eine Komponente, welche über den *Inspector* zu einem Objekt hinzugefügt werden kann. Wenn ein Objekt eine *Rigidbody*-Komponente besitzt, werden die Bewegungen von der Physik-Engine von *Unity* berechnet. Dadurch kann physikalisches Verhalten wie Schwerkraft und Kollisionen realisiert werden. Darüber hinaus bietet der *Rigidbody* die Möglichkeit, die Kräfte, die auf das Objekt einwirken, realistisch zu steuern. Bei der Erstellung von Objekten sollte darauf geachtet werden, dass sie sich im richtigen Größenverhältnis befinden. Eine *Unity*-Einheit entspricht hierbei einem Meter. Wird dies nicht beachtet, kann es beispielsweise dazu kommen, dass die Spielphysik wie in „Zeitlupe“ erscheint, da die Physik-Engine mit den Standardeinstellungen anhand der *Unity*-Einheiten rechnet.

Scripting Eine essenzielle Komponente beim Erstellen von Anwendungen in *Unity* ist das sogenannte *Scripting* [327]. Skripte sind Dateien in der Programmiersprache *C#* und können dafür genutzt werden, um auf Eingaben des Nutzers zu reagieren oder dafür zu sorgen, dass Ereignisse in der Anwendung zum richtigen Zeitpunkt auftreten. Auch für grafische Effekte, physikalisches Verhalten wie dem *Rigidbody* oder KI-Systeme werden Skripte benötigt. Um dies zu vereinfachen, bietet *Unity* bereits eine Vielzahl an Funktionen, die in der Dokumentation nachgeschlagen werden können. So werden Funktionen für beispielsweise Kollisionsabfragen, Objektzugriffe und Zeitmessungen bereits von *Unity* bereitgestellt.

3.3.4 Blender

Auch wenn mittlerweile eine Vielzahl an 3D-Modellen online angeboten werden, mit Kosten verbunden oder auch kostenfrei und sich dieses Angebot täglich erweitert, werden bei der Entwicklung von 3D-Anwendungen immer wieder spezifische Modelle benötigt. Um diese zu erstellen, werden sogenannte Grafikprogramme verwendet.

Blender [89, 132] ist eines dieser 3D-Grafikprogramme, welches zur Gestaltung von virtuellen 3D-Umgebungen genutzt werden kann. Die Open-Source-Grafiksoftware bietet die Möglichkeiten, Objekte zu modellieren, zu texturieren und auch zu animieren. Zusätzlich kann es als Videoschnittprogramm genutzt werden. *Blender* wurde bereits im Jahre 1995 veröffentlicht und wird von professionellen und ehrenamtlichen Mitarbeitern stetig weiter entwickelt. Hierbei sind *C* und *C++* die Programmiersprachen, wohingegen *Python* als Skriptsprache verwendet wird. Trotz des zuvor angesprochenen Funktionsumfangs benötigt das Programm vergleichsweise wenig Speicher und läuft auf den meisten Systemen, darunter *Windows*, *Linux* und *macOS*.

Blender und Unity

Blender kann mit den gängigsten Spiel-Engines genutzt werden. So ist es möglich, Blender-Dateien in *Unity* einzufügen, zu nutzen und über *Unity* direkt in *Blender* zu öffnen, wo sie dann bearbeitet und erweitert werden können. Diese Änderungen werden dann automatisch direkt in *Unity* übertragen. So können beispielsweise Modelle um Animationen in *Blender* erweitert werden, die dann direkt in *Unity* zugänglich sind und dort umgesetzt werden können. Falls man diese Option nicht nutzen möchte, können Objekte auch in verschiedenste Standardformate exportiert werden, darunter *.fbx*, *.stl* und *.obj*, um nur einige davon zu nennen.

Um einige Szenen innerhalb der später vorgestellten Therapieanwendungen zu bereichern, wurde das Grafikprogramm *Blender* verwendet. Es wurden genutzt, um Modelle anzupassen, Animationen zu erstellen und um für eine möglichst realistisch aussehende Szenengestaltung zu sorgen.

4 State of the Art

Die Idee von haptischer Technologien ist fast so alt wie die Technologie selbst. Daher ist auch das Konzept der Einbindung von haptischen Elementen in Anwendungen nichts Neues. Schon vor den heutigen HMDs, gab es bereits Ansätze von Haptik in virtuellen Realitäten. Der große Unterschied zu den bisherigen Ansätzen ist die neue Hardware, die im Zusammenhang mit den aktuellen HMDs versucht, die virtuelle und erweiterte Realität auf ein neues immersives Level zu heben und dabei die Interaktionsmöglichkeiten zu erweitern.

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der haptischen Technologien aufgezeigt und die wissenschaftliche Bedeutung der Ergebnisse der bisherigen Forschungsarbeiten analysiert. Ziel ist es, den aktuellen Stand der Technik aufzuschlüsseln, ihn anhand der aktuellen Forschungen zu bewerten und eigene Schlüsse für die Entwicklung therapeutischer Anwendungen mit haptischen Elementen zu ziehen. Dazu werden in einem ersten Schritt die Forschungsarbeiten betrachtet, die sich mit den Auswirkungen von Haptik auf den Nutzer befassen. So können mögliche Herausforderungen, aber auch Chancen erkannt werden. Anschließend werden bereits in der Forschung entwickelte haptische Module betrachtet, die derzeit noch nicht auf dem Markt kommerziell verfügbar sind. Diese geben die Richtung an, in welche sich dieser Bereich möglicherweise entwickeln könnte.

Ergänzend wird der aktuelle Forschungsstand von therapeutisch wertvollen VR- und AR- Anwendungen betrachtet, um sich anhand der aktuellen Forschungen zu orientieren. Dadurch kann bereits erfasst werden, für welche Therapiebereiche es bisher virtuelle Anwendungen gibt, wie diese sich auszeichnen und was für die Entwicklung einer psychologisch wertvollen Anwendung wichtig ist.

Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einem ausführlichen Katalog der aktuellen haptischen Hardware, die auf den freien Markt abzielen. Die haptische Technik lässt sich hierbei in viele Facetten aufschlüsseln und reicht vom haptischen Handschuh bis zum VR-optimierten Gamingstuhl.

4.1 Forschungsarbeiten: Haptische Einsatzbereiche

Die Betrachtung aktueller Forschungsarbeiten mit dem Schwerpunkt auf Haptik ist essenziell, um bereits bestehende Forschungsfragen beantworten zu können und neue, wichtige Aspekte zu ergänzen. Aus diesem Grund wird der Fokus in diesem Unterkapitel vor allem auf aktuelle Forschungsarbeiten gelegt, die sich mit der Wirkung von Haptik befassen haben.

4.1.1 Haptik im medizinischen Kontext

Haptische Technologien können für unterschiedliche Einsatzbereiche genutzt werden. Ein Beispiel zeigt der Journalbeitrag *Evaluation of haptic virtual reality user interfaces for medical marking on 3D models* [173]. Dieser vergleicht die Möglichkeiten der dreidimensionalen Visualisierung zur medizinischen Diagnose und der Planung in Kombination mit Haptik. Dazu wurden drei unterschiedliche Setups getestet: einmal die Bearbeitung von medizinischen Modellen am Computer mit der Maus, einmal mit einem HMD mit einem vibrotaktilen Controller und einmal mit einem HMD und dem haptischen Eingabegerät Geomagic Touch X [226]. Alle Eingabegeräte sind in Abbildung 10 veranschaulicht. Der Geomagic Touch X wird im späteren Kapitel 4.4.3 noch einmal im Detail vorgestellt. Dieses Gerät ist vom Aufbau her mit einem Stift an einem Greifarm zu vergleichen, wobei der User über den Stift präzise 3D Bewegungen übermitteln kann. Durch den Greifarm können dann unterschiedliche Widerstände auf den Stift ausgeübt werden, die das haptische Feedback in Form von Force Feedback darbieten.

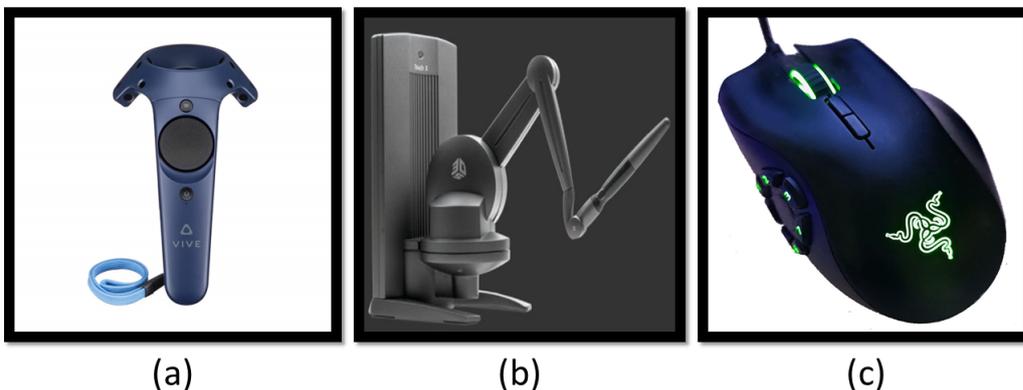


Abbildung 10: Modellhafte Darstellung zur Veranschaulichung der Versuchstechnik
(a): *HTC VIVE* Controller [50], (b): Geomagic Touch X [226], (c): 2D Setup mit einer Maus

Untersucht wurde die Zeit bis zur Erfüllung der Aufgabe und ihre Genauigkeit. Hierbei zeigte sich, dass das vibrotaktile Setup in Bearbeitungszeit und das kinästhetische Setup mit dem Geomagic Touch X in der Genauigkeit dem 2D Setup überlegen war, sofern die Aufgabe komplex genug war. Demnach gibt es Hinweise darauf, dass bei der Arbeit mit komplexen dreidimensionalen volumetrischen medizinischen Bildern haptische Steuerungsmöglichkeiten dem herkömmlichen 2D Setup überlegen sein könnten.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch die Forschungsarbeit von Collaço et al. [46]. Sie konzipierten ein Virtual Reality-Training für zahnärztliche Anästhesietechniken in einem haptischen VR-Simulator. Auch hier wurde die Präzision gemessen. Die Gruppe mit Haptik zeigte mehr Genauigkeit und Vertrauen in die Verabreichung der Anästhesie und gab an, dass die Handhabung mit der Spritze viel realistischer wirkte.

Die Forschungsarbeit von M. Zhou et al. [388] zeigte im Bereich des Operationstrainings bei einer Laparoskopie das Lernen mithilfe von haptischem Feedback im allgemeinen signifikant besser funktioniert. Jedoch wurde dieser Effekt nur innerhalb der ersten fünf Stunden des Trainings festgestellt. Dieser Effekt wird sich mit dem Erreichen eines ersten Leistungsplateaus erklärt, welches durch Haptik womöglich in kürzerer Zeit erreicht werden kann. So scheint insbesondere in der Medizin und Medizinlehre hinsichtlich haptischer Effekte geforscht zu werden.

4.1.2 Muskelaktivität bei Force Feedback

Die Studie *Comparison of Electromyogram During Ball Catching Task in Haptic VR and Real Environment* [224] beschäftigt sich mit den Muskelaktivitäten in der virtuellen Realität, ausgelöst durch haptische Elemente. Aufgabe der Probanden war das Fangen eines Balles, einmal in der virtuellen Umgebung mit dem haptischen Präsentationsgerät *SPIDAR-HS* und einmal in der Realität. Das *SPIDAR-HS* setzt für die Haptik Force Feedback ein, welches durch die Zugkraft eines Drahtes ausgelöst wird. Die Muskelaktivität wurde durch ein EMG-Signal des Unterarms gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass die durchschnittlichen Werte des EMG-Signals in VR um 45,2 % geringer waren als in der realen Umgebung. Ein Grund hierfür könnte sein, dass das Force Feedback nicht so viel Kraft ausübt wie die Schwerkraft in der Realität. Jedoch konnte ebenso beobachtet werden, dass die dynamische Muskelaktivität in beiden Testumgebungen sehr ähnlich zueinander war. Dementsprechend lässt sich folgern, dass zwar die angewendete Kraft in VR nicht die Gleiche ist, jedoch die dynamische Muskelaktivität durch VR und Haptik ähnlich nachgebildet werden kann.

4.1.3 Haptik und Immersion

Die Immersion ist ein wichtiger Faktor der Haupthypothese. Ein aktuelles Experiment von Gibbs et al. [109] zeigt, dass Haptik die Immersion steigern kann. Hierzu wurde den Teilnehmern ein virtueller Ball präsentiert, welcher auf einem virtuellen Stock hüpfte, den sie an beiden Enden hielten. Die Ergebnisse zeigten eine Steigerung der Präsenz, sofern nicht nur die Bewegungen des Balls gesehen, sondern auch gefühlt werden konnten. Allein eine haptische Rückmeldung scheint demnach ein stärkeres Gefühl von Präsenz hervorzurufen als der visuelle Eindruck allein. Darüber hinaus verbesserte das haptische Feedback die Lokalisierung der Stelle, auf welcher der Ball auf den Stock sprang. Auch eine etwas ältere Studie von 2018 [102] hat sich bereits an ähnlichen Testungen mit einer taktilen Weste versucht. Auch hier konnte durch die haptischen Reize eine Steigerung der Präsenz und des Realismus erkannt werden. Garcia-Valle et al. verglichen neben Szenarien mit und ohne Haptik auch unterschiedliche Haptik-Elemente miteinander. So war neben dem taktilen Feedback auch thermales Feedback in der Weste integriert. Die thermischen Reize wurden von den Probanden aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit realen Empfindungen besser bewertet als die vibrotaktile Rückmeldung. Noch ein weiteres interessantes Ergebnis ergab sich in Bezug auf die Nutzer der Anwendung. Fachleute benötigen danach qualitativ hochwertige Stimuli und eine angemessene Synchronisierung der visuellen, auditiven und haptischen Reize, wohingegen durchschnittlichen Nutzern Stimuli von geringerer Qualität genügen, um ein Gefühl von Realismus zu bekommen.

4.1.4 Haptik zur Steigerung von Angst

Auch Frieden et al. [97] konnten einen möglichen Anstieg der Immersion durch haptische Erweiterungen feststellen. Dabei wurde der Eindruck nicht in Form eines Fragebogens erfasst, sondern mithilfe der physiologischen Reaktionen der Probanden, insbesondere anhand ihrer Hautleitfähigkeit. Zu diesem Zweck wurde eine Anwendung genutzt, bei der Nutzer über eine virtuelle Holzplanke laufen sollten. Diese Planke befand sich in der Simulation auf einer Höhe von 160 Metern. Allein die Szenerie sorgte bei den Betroffenen für einen signifikanten Anstieg der Hautleitfähigkeit um 55,9 %. Dieser Effekt konnte durch Haptik zusätzlich gesteigert werden. Dazu wurde eine reale Planke genutzt, die sich direkt auf dem Boden befand, über die die Probanden während der Anwendung laufen sollten. Zusätzlich wurde ein Ventilator eingesetzt, der den Wind simulierte. Diese Erweiterungen führten zu einem Anstieg der Hautleitfähigkeit um 94,7 %, was auf eine Steigerung der Angst zurückzuführen sein könnte.

4.1.5 Haptik für hörgeschädigte und gehörlose Menschen

Haptik kann auch genutzt werden, um gehörlosen und schwerhörigen Menschen in der virtuellen und erweiterten Realitäten zu unterstützen. Gerade in Bezug auf klangbezogene VR-Aufgaben können durch Haptik die Audioinformationen anders dargestellt werden. Mohammadreza Mirzaei, Peter Kán und Hannes Kaufmann stellen in ihrem Artikel *Effects of Using Vibrotactile Feedback on Sound Localization by Deaf and Hard-of-Hearing People in Virtual Environments* [204] einen eigenen VR-Anzug vor, der betroffenen Menschen durch Haptik bei der Erfüllung von Aufgaben unterstützen soll. Die Studien zeigten dabei, dass der Anzug die Bearbeitungszeit von Aufgaben erheblich verbessern kann. Jedoch gaben die Tester an, dass sie das vibrationsbasierte Feedback des Anzugs lieber nur an den Ohren verwenden würden als den gesamten Anzug. Ob sich diese Präferenz nur auf die Aufgaben der Studien beziehen lässt, konnte hierbei nicht festgestellt werden. Eine weitere Studie hat jedoch gezeigt, dass es keinen signifikanten Zeitunterschied beim Erledigen der gestellten Aufgaben zwischen dem VR-Anzug mit vier Vibrationsmotoren und den zwei Vibrationsmotoren an den Ohren gab.

Auch die Arbeit „Nutzenorientierter Entwurf Assistiver Technologie für hörgeschädigte Menschen“ von Mielke [202] beschäftigt sich mit der Unterstützung hörgeschädigter Menschen. In dieser Arbeit wird ein Assistenzsystem vorgestellt, welches akustische Signale in spezifische visuelle und haptische Signale übersetzt, um damit den Betroffenen den Alltag zu erleichtern. Dazu werden die akustischen Signale über ein Smartphone oder eine Smartwatch aufgenommen und von einem internen System ausgewertet, um anhand dieser die passenden Informationen an den Nutzer zu übermitteln.

4.2 Forschungsarbeiten: Haptischer Technologie

Es gibt bereits einige technische Module, die Haptik in die virtuelle und erweiterte Realität bringen können. In diesem Zusammenhang haben bereits einige Firmen marktreife Technologie hervorgebracht. Diese werden im weiteren Verlauf der Arbeit genauer beschrieben. In diesem Abschnitt sollen technische Möglichkeiten besprochen werden, deren Grundlage aus Forschungsarbeiten entstammt und die demnach nicht frei verkäuflich sind. Durch ihre Aktualität können sie wegweisend sein und einen Aufschluss darüber geben, wie die Haptik sich in den nächsten Jahren entwickeln wird.

4.2.1 Haptische Controller

Controller sind die Standardeingabegeräte in der virtuellen und erweiterten Realität. Sie geben in den meisten Fällen durch ein Tracking und Tasten die Möglichkeit, unterschiedlich mit der virtuellen Welt zu interagieren. Die folgenden Arbeiten befassen sich mit haptischen Controllern, die durch technische Erweiterungen die virtuelle Welt immersiver und fühlbarer gestalten möchten:

Erweiterung des HTC-VIVE Controllers

Der *HTC VIVE* Controller ist das Standardeingabegerät des *HTC VIVE* HMDs und besitzt vibrotaktilen Feedback, welches über den Griff und das Touchpad fühlbar ist. In einer Forschungsarbeit [314, 315] der Universität Bremen wurde diese Haptik ergänzt. Mithilfe eines Servomotors wurde ein Force Feedback kreiert, welches den Widerstand des Trigger-Knopfes an der Unterseite des Controllers reguliert (siehe Abbildung 11a). Dies soll dazu dienen, das unterschiedliche Gewicht der Objekte in der VR zu simulieren, wurde jedoch nicht von allen Probanden gleich gut wahrgenommen.

Transcalibur

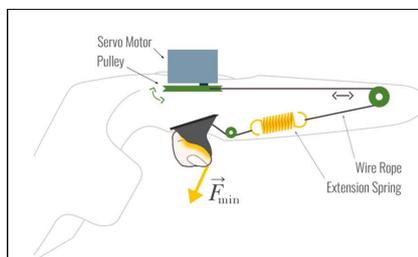
Eine weitere Möglichkeit, das Gewicht eines Objektes realistisch in der VR zu simulieren, zeigt der *Transcalibur* [282, 283]. Hierbei handelt es sich um einen Controller, welcher an seinem vorderen Ende zwei bewegliche Stangen besitzt, an welchen jeweils ein Gewicht dynamisch vor- und zurückbewegt werden kann. Durch die Bewegung der Stangen um eine Achse und den bewegbaren Gewichten soll sich die Illusion der Masseneigenschaft und der Formwahrnehmung für den Nutzer ergeben, die Objekte wie beispielsweise ein Schwert simulieren (siehe Abbildung 11b). Die entsprechende Nutzerstudie konnte zeigen, dass das System erfolgreich die Wahrnehmung verschiedener gewünschter Formen in einer virtuellen Umgebung ermöglicht und den immersiven Eindruck verbessert.

ElastiLinks

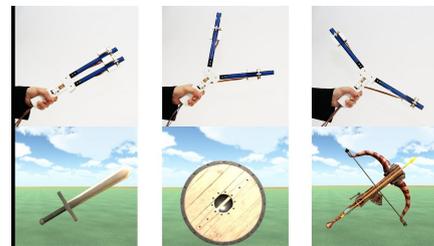
Tzu-Yun Wei et al. [368] haben einen Controller entwickelt, um die richtigen Kraftangriffspunkte (PAF) für haptisches Feedback zu erfassen. Daraus entstand der *ElastiLinks*, der eine Krafrückmeldung zwischen den Controllern mit dynamischen PAFs ermöglicht (siehe Abbildung 11c). Dieser kann genutzt werden, um beispielsweise das Ziehen eines virtuellen Bogens oder einer virtuellen Angel zu simulieren. Dazu werden zwei Links genutzt, welche mehrstufig Widerstand- und Stoßkraft erzeugen, wodurch ein realistisches Gefühl geschaffen werden kann. Eine Studie konnte zeigen, dass *ElastiLinks* das virtuelle Erlebnis für die Teilnehmer verbessert hat. Es wurden signifikante Verbesserungen in den Bereichen „Realismus“, „Vergnügen“ und „Unterscheidbarkeit“ gemessen, die in allen getesteten Anwendungsbereichen (Shooter, Kampfspiel, Angeln) auftraten.

TORC

Der *TORC* [175, 248] (Touch Rigid Controller) ist ein von *Microsoft* entwickelter haptischer Controller, der mit kleinen Vibrationsmotoren Druck und Textur von virtuellen Objekten auf Daumen-, Zeige- und Mittelfinger übermitteln soll. Ein Drucksensor ermöglicht das Halten, Eindrücken und Kneten von virtuellen Objekten, wodurch verschiedene Arten der Interaktion ermöglicht werden können. Ein zusätzliches Touchpad mit integriertem Vibrationsmotor ermöglicht die Rotation der gegriffenen Objekte und die gleichzeitige Simulation der Textur.



(a) Controllererweiterung [314]



(b) Transcalibur [283]



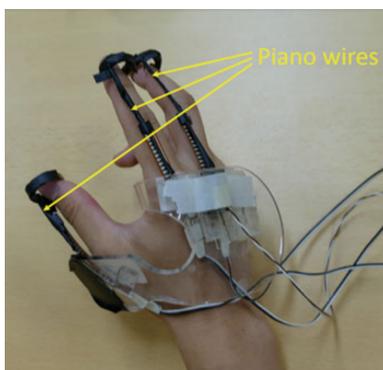
(c) ElastiLinks [368]

Abbildung 11: Darstellung einiger Controllererweiterungen

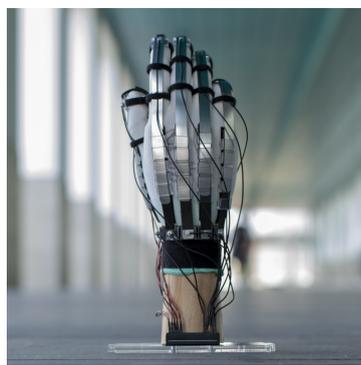
4.2.2 Datenhandschuhe

Neben den bewährten Controllern versuchen sich immer mehr Forscher an haptischen Datenhandschuhen. Durch diese wird es möglich, die eigenen Hände zur Interaktion in der virtuellen Welt zu nutzen. Dies kann zu einer Steigerung der Immersion beitragen. Zusätzlich sind die Finger mit vielen Rezeptoren versehen und sehr empfindsam gegenüber taktilen Veränderungen.

Aus diesem Grund verwundert es nicht, dass sich die Forschung aktuell mit einer solchen Technologie beschäftigt. In diesem Abschnitt werden einige dieser Forschungsarbeiten besprochen, die solch eine haptische Technologie entwickelt und getestet haben.



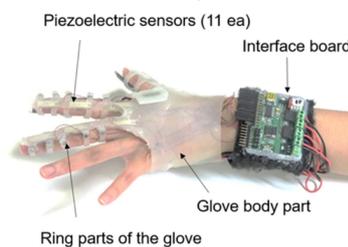
(a) Matsumoto [191]



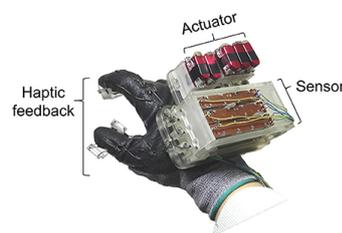
(b) DextrES [79]



(c) Wireality [86]



(d) Thermal Display Glove [164]



(e) Baik [12]



(f) CapstanCrunch [285]

Abbildung 12: Experimentelle haptische Handschuhe

Force Feedback mit Pianoseiten

Das Erzeugen von Widerständen auf die Hände und Fingergelenke ist ein aktuelles Thema in Bezug auf die Entwicklung von haptischen Datenhandschuhen. Eine vielversprechende Idee ist die Nutzung eines Exoskeletts, das die Fingerspitzen zurückhält, wobei bereits einige auf dem Markt befindlichen Datenhandschuhe dieses Prinzip nutzen. Allerdings hat dieser Ansatz auch Nachteile, wie hohe Kosten, Verletzungsgefahren bei einer falschen Motorstärke und das zusätzliche Gewicht der Handschuhe. Die Arbeit von Matsumoto et al. [191] aus dem Jahre 2018 zeigt, dass das Abbilden eines Widerstandes auch durch Pianoseiten ermöglicht werden kann. Die feinen Fäden sind nach Matsumoto et al. in der Lage, die subjektive Empfindung des Nutzers gegenüber dem virtuellen Objekt zu steigern. Der selbst konzipierte Handschuh ist in Abbildung 12a zu sehen.

DextrES

Passiv abbremsen, statt selbst einzugreifen. Der haptische Handschuh der EPFL Lausanne mit dem Namen *DextrES* [79] verfolgt dieses Konzept und kann in Abbildung 12b gesehen werden. Mit nur 8 Gramm handelt es sich um einen der leichtesten VR-Handschuhe mit Force Feedback Funktionalität. Dies liegt an dem fehlenden Exoskelett, denn die Idee hierbei ist es, mit Baumwollfäden für den nötigen Widerstand zu sorgen und dadurch die Bewegungen des Nutzers effektiv abzubremesen. Bis zu 40 Newton Widerstand können dadurch erzeugt werden. In Anbetracht dessen ist er nicht nur leichter, sondern verbraucht auch deutlich weniger Energie als vergleichbare Technik. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass sich die Greifpräzision in VR durch den Handschuh verbessert.

Wireality

Da für Elemente wie Wände, Gelände oder Möbel das haptische Feedback mit Vibration nicht ausreichend ist, um den Widerstand vollständig zu simulieren, wurden Technologien wie das *Wireality* [86] entwickelt. Dieses System von Fang et al. basiert auf der Idee des Force Feedback, wobei die Gelenke an den Händen durch einziehbar Drähte zurückgehalten werden können. Mit insgesamt sieben Drähten, fünf für die Finger, einem für den Handrücken und einem für das Handgelenk, ist es so möglich, komplexere Oberflächen in der virtuellen Realität ertastbar zu machen. Die Motoren, welche für das Force Feedback verantwortlich sind, liegen auf den Schultern und das ganze System kann wie eine Weste getragen werden. Mit dieser Technologie können verschiedenste Oberflächenstrukturen simuliert werden. Dabei reicht das Spektrum von dem Ertasten einer einfachen Wand bis hin zu einem detaillierten Modell einer Statue.

Thermal Display Glove

Da die Wärmewahrnehmung für das alltägliche Leben von wesentlicher Bedeutung ist, hat das Team von Kim et al. [164] den Versuch unternommen, haptische Handschuhe mit thermischer Rückkopplung zu entwickeln. Ziel hierbei war es, das Realitätsempfinden von Nutzern innerhalb der virtuellen Realität zu verbessern. Mit piezoelektrischen Sensoren werden bei diesem Modell die Handbewegungen getrackt und in die virtuelle Realität übertragen. Für die thermale Haptik wurden maßgeschneiderte, flexible Heizelemente entwickelt, welche in weniger als 0,5s die Raumtemperatur an den Berührungspunkten um 10°C senken können. Dies ist für konventionelle Systeme eine Herausforderung, die von Kim et al. gelöst werden konnte. Die anschließende Studie untersuchte dann die Korrelation zwischen der thermischen Wahrnehmung der Nutzer und der Farbdarstellung von Objekten. Die Befragung konnte zeigen, dass das thermale Feedback zu einer realistischeren und eindringlicheren Erfahrung bei der Interaktion mit der virtuellen Realität führte. Der Thermal Display Glove kann in Abbild 12d genauer betrachtet werden. Die piezoelektrischen Sensoren liegen über den Fingern und werden durch Ringstrukturen des Handschuhs gehalten. Am Handgelenk befindet sich eine Schnittstellenplatine zum Steuern der Sensoren.

Haptische Handschuhe mit Roboter-Mechanismus

Auch die Robotik bringt neue Ideen für die Umsetzung von haptischem Feedback. Baik et al. [12] entwickelten einen haptischen Handschuh mit mechanischen Sehnen, der dazu in der Lage sein soll, Widerstände auf der Haut zu erzeugen. Das Modell des haptischen Handschuhes kann in Abbildung 12e betrachtet werden. Hier liegt deutlich mehr Gewicht auf dem Handrücken als in den anderen Modellen, da die Aktuatoren dort platziert wurden.

Bei einer Forschungsarbeit zu diesen Handschuhen konnte durch die haptische Technik ein Anstieg des Realismuswerts gemessen werden. Es werden jedoch von den Forschern mehr Daten zu den fühlbaren Kraftunterschieden benötigt, um die Kraftverteilung zu optimieren.

CLAW und CapstanCrunch

Auch Microsoft arbeitet an haptischen Prototypen. Der *CLAW* [141] ist hierbei ein haptischer Controller, welcher Druck auf die Fingerspitzen ausübt. Er soll zum einen den Abzug von Schusswaffen simulieren können, aber auch dazu genutzt werden, Oberflächen von den in der virtuellen Realität dargestellten Objekten darzustellen.

Ebenfalls haben sie im Jahr 2019 ihren *CapstanCrunch* [285] vorgestellt. Dies ist ein Prototyp eines handflächenbasierten, haptischen Controllers, der jedoch sehr ähnlich zu den bereits vorgestellten haptischen Handschuhen fungiert. Er soll durch einen Bremsmechanismus, den sogenannten *capstan-plus-cord-variable-resistance brank mechanism* für Force Feedback am Zeigefinger ohne großen Stromverbrauch sorgen. Demnach sind Seilzüge am Gerät befestigt, die für den Widerstand sorgen. In einer eigenen Studie [285] verglichen die Entwickler die Wirkung der beiden genannten Prototypen. Dazu erstellten sie ein weiteres Modul, welches ähnlich zu den anderen beiden Modellen war, außer dass der Fingerarm nur mit einer festen Feder verbunden war. Zum Vergleich ließen sie die Probanden mithilfe der Prototypen einen Gummiball in der virtuellen Realität anfassen und verglichen die Eindrücke der Probanden. Hierbei schnitt der *CapstanCrunch* am besten ab, aber auch der *CLAW* konnte mit der Simulation der Steifigkeit im Vergleich zum anderen Controller überzeugen. Jedoch sind beide Prototypen in Größe und Funktion noch nicht vollends ausgereift.

Diese sind nur einige Forschungsarbeiten mit dem Fokus auf haptische Handschuhe. Jedoch wird deutlich, dass ein verstärkter Fokus auf die Entwicklung von glaubhaften Widerständen gelegt wird. Einige ältere Modelle wurden bereits im Zuge der Arbeit von Petrenko et al. [235] zusammengetragen. Darunter die *ExoTen-Gloves*, *RML Gloves*, *CyberGrasp*, *The Rutgers Master II* und *Wolverine*. All diese Handschuhe besitzen verschiedene Systeme, haben jedoch ebenfalls zum Ziel, glaubhafte Widerstände zu erzeugen. Petrenko et al. kommen bei ihrer Arbeit zum Schluss, dass die Entwicklung haptischer Handschuhe mit hohen Kosten und erheblichen Verlust bei der Übertragung der Leistung einhergehen. Sie stellten ebenfalls fest, dass derzeit meist nur Labormuster präsentiert und untersucht werden, die nicht zum Kauf angeboten werden. Dies betont noch einmal die Wichtigkeit dieser Arbeit und die notwendige Erforschung verfügbarer haptischer Technologien auf dem Markt.

4.2.3 Weitere haptische Technologien

Wie bereits gezeigt werden konnte, liegt der Fokus vieler taktiler Technik auf Eingabegeräten, insbesondere für die Hände. Seien es Controller oder Datenhandschuhe, beide Arten dieser haptischen Technologien werden reichlich erforscht und sind bereits auf dem Markt in unterschiedlicher Form erhältlich. Jedoch gibt es weitere Möglichkeiten, die virtuelle Welt durch Haptik zu bereichern. Im Folgenden sind dazu einige Beispiele aufgeschlüsselt, die Haptik nicht auf die Hände übertragen, sondern neuartige Technologien geschaffen haben, um die virtuelle Welt fühlbar zu machen.



(a) Haptopus [157]



(b) RealWalk [386]



(c) Mouth Feedback [281]



(d) Chemical Haptics [179]

Abbildung 13: Weitere experimentelle haptische Technologien im Überblick

Haptopus

Die *University of Electro-Communications Chofu* hat in einer Forschungsgruppe eine neue Art des haptischen Feedbacks entwickelt [157]. Bei dieser Art der Wahrnehmung werden die Empfindungen nicht an die Hände, sondern durch Saugnoppen in das Gesicht geleitet. Das Gerät mit dem Namen *Haptopus*, bestehend aus zehn Noppen (siehe Abbildung 13a), saugt durch einen Luftansaugmechanismus die Haut an und versucht das haptische Gefühl des mit dem Controller berührten Gegenstands zu simulieren. Durch den unterschiedlichen Saugdruck kann sowohl ein einfaches Berührungsfühl als auch ein Schmerzempfinden wie durch einen Dorn erzeugt werden. Dies scheint nach ersten Ergebnissen der Entwickler die Qualität der VR-Erfahrung verbessern zu können.

RealWalk

RealWalk [386] sind haptische Schuhe, optimiert für die virtuelle Realität, welche die Empfindungen von Bodenoberflächentexturen und Verformungen mit einer magnetorheologischen Flüssigkeit erzeugen können. Jeder Schuh besteht dabei aus zwei magnetorheologischen Aktuatoren, einem Drucksensor für die Einlegesohle und einem Fußpositionssensor, die auch in Abbildung 13b gesehen werden können. In der dazugehörigen Studie verglichen die Autoren die Simulation von verschiedenen Oberflächen wie Gras, Sand, Schlamm und Schnee und ließen diese in den Kategorien Realismus, Unterscheidbarkeit und Zufriedenheit bewerten. Hierbei schnitten die *RealWalk* im Vergleich zu vibrotaktil-haptischen Schuhen, den VibShoes, in allen gezeigten Szenarien besser ab. Diese neue Möglichkeit Oberflächen darzustellen, könnte dazu beitragen, die virtuelle Realität weiter zu ergänzen und zusätzlich ungewollte Effekte wie Cyber Sickness zu reduzieren.

Mouth Feedback

Das *Robotics Institute* der *Carnegie Mellon University* stellte im Jahre 2022 ein auf Ultraschall basierendes Gerät vor, welches Effekte und Impulse auf den Mund des VR-Nutzers übertragen kann. In dem dazugehörigen Paper *Mouth Haptics in VR using a Headset Ultrasound Phased Array* von Shen et al. [280, 281] wird das kompakte Array an Ultraschallwandlern vorgestellt, welches an der Unterseite des HMDs befestigt werden kann und für die haptische Wirkung sorgt. Die Wandler können genutzt werden, um haptisches Feedback auf den Lippen, den Zähne oder der Zunge des Nutzers zu erzeugen. Darunter können einzelne Punkte mit einem Impuls angesprochen, aber auch persistente Vibrationen ausgeführt werden. Diese können dann unterschiedliche Gefühle bei dem VR-Nutzer auslösen. Beispiele hierfür wären das Gefühl von Flüssigkeiten, Zigaretten oder sogar andere Lippen, wodurch es nach den Forschern möglich wäre, ein Kussgefühl zu imitieren. Eine solche Technik kann beispielsweise bei der Suchtentwöhnung für Zigaretten oder Alkohol von großer Bedeutung sein, da zu der Sucht auch das haptische Empfinden der Personen konditioniert ist. Eine erste Studie zeigt bereits eine deutliche Steigerung der Immersion durch das Gerät. Dies könnte dafür sprechen, dass die haptischen Eindrücke bereits sehr glaubwürdig vermittelt werden können, was zu einem Mehrwert in der Therapie führen könnte.

Chemical Haptics

Neben dem Versuch, haptisches Feedback über mechanische Elemente zu vermitteln, gibt es mittlerweile von der Universität in Chicago den Ansatz, chemische Prozesse zu nutzen, um differenzierbare Empfindungen wie Juckreiz, Kribbeln, Temperatur und Schmerz auszulösen. Somit basiert diese Haptik auf der Reaktion der Haut mit spezifischen chemischen Inhaltsstoffen und nicht mehr auf mechanischen Elementen.

Im Jahre 2021 brachten Lu et al. [179] ein Paper heraus, welches sich intensiv mit dem Thema haptischer Empfindungen durch Stimulanzien zur äußerlichen Anwendung auf der Haut beschäftigte. In einer ersten Studie wurden die zeitlichen Profile der durch die einzelnen Chemikalien ausgelösten Empfindungen charakterisiert. In einer zweiten Studie wurden fünf interaktive VR-Szenarien entworfen, in welcher die chemische Haptik gegen keine Haptik getestet wurde. Dazu wurde ein tragbares, haptisches Gerät entwickelt, welches den Hautkontakt mit verschiedensten chemischen Stoffen ermöglicht. Dieses kann in Abbildung 13d gesehen werden. Hierbei sind die blauen Linien die chemische Flüssigkeit, die durch das Armband geleitet wird. Die chemischen Reaktionen sollten dabei zu den Eindrücken in der virtuellen Realität passen. So kann Minze, ähnlich wie ein Peltierelement, die Kälte-Rezeptoren des Körpers ansprechen. Die Ergebnisse der Studien zeigten, dass dieser Forschungsansatz sehr vielversprechend ist und Chemikalien haptische Empfindungen in Echtzeit auf die Haut übertragen können. Ebenfalls wurde die Anwendung durch die chemische Haptik als immersiver wahrgenommen. Jedoch ist dieses Forschungsgebiet noch sehr neu und es müssen weitere chemische Reaktionen gefunden werden, um eine Vielzahl an Empfindungen optimal abdecken zu können.

Künstliche Haut

Haptische Elemente direkter und besser spürbar zu machen, das ist das Ziel der sogenannten „künstlichen Haut“. An dieser versuchen sich bereits einige Wissenschaftler und Unternehmen. So beispielsweise die EPFL Lausanne [171, 291], die ebenfalls an den haptischen Datenhandschuhen DextrEs arbeiten. Sie haben ein aus Latex bestehende Druckluft-Haut entwickelt. In die kleine Gitterstruktur kann Luft eingelassen werden, die dann Berührungen simulieren kann. Möglich wäre es, auf Basis dieser Struktur, gesamte Kleidung aus dieser „Haut“ zu konstruieren.

Die *Cornell University* arbeitet an einer ähnlichen Technik, ebenfalls mit Druckluft in Kombination mit hautähnlichem, flexiblen Kunststoff. Diese Technik nennen sie *Omnipulse* [169]. Die Idee besteht darin, diese Technik in Controller, Handschuhe oder haptische Westen zu integrieren. Auf Eingabe innerhalb der VR-Anwendung kann dann Luft in die künstliche Haut gepumpt werden, um Widerstände zu simulieren.

4.3 VR/AR Therapieansätze

Zur sinnvollen Integration von Haptik in Therapieanwendungen muss neben der technischen Entwicklung auch der derzeitige Forschungsstand von VR- und AR-Therapien im Detail betrachtet werden. Die Idee, die virtuelle und erweiterte Realität für die Therapie zu nutzen, ist nicht neu und wurde durch die günstigen und portablen Head-Mounted Displays weiter begünstigt. Aufgrund dessen sind in den letzten Jahren viele Forschungsarbeiten hervorgegangen, die diese neue Technologie für Therapiezwecke evaluieren. Der primäre Fokus lag am Anfang der Forschungszeit auf Phobien, deckt mittlerweile aber auch Felder wie Essstörungen, posttraumatische Belastungsstörung, Psychosen und Autismus-Spektrum-Störungen ab und zeigt hier bereits vielversprechende Ergebnisse [77]. Dieses weitreichende Themenfeld kann kaum in Gänze abgedeckt werden, weshalb in dieser Arbeit nur auf spezifische Krankheitsfelder eingegangen wird, die Aufschluss darüber geben könnten, wie virtuelle Anwendungen therapeutisch eingesetzt werden können und zu welchen Schlüssen die aktuelle Forschung kommt.

4.3.1 Angststörungen

Angststörungen sind, wie bereits in den Grundlagen 3.2.3 besprochen, sehr vielfältig und zeichnen sich meist dadurch ab, dass Betroffene durch ihre Ängste stark in ihrem alltäglichen Leben eingeschränkt werden. Aus diesem Grund gibt es bereits unterschiedlichste Therapieansätze, die sich die Jahre über stetig weiter entwickelt haben. Dies ist von großer Bedeutung, da die Anzahl an Betroffenen stetig steigt. Zwischen 1990 und 2019 ist die Anzahl an Erkrankten um mehr als 55 % [154] gewachsen. So betrifft die Angststörung schätzungsweise 4,05 % [154] der Weltbevölkerung, was durch die Covid-19-Pandemie in den letzten Jahren noch einmal begünstigt wurde. So stieg die Zahl der Betroffenen schätzungsweise noch einmal um 25,6 % [45] an. Aus diesem Grund sind neue und innovative Lösungen gefordert, die diesen Zahlen gerecht werden können.

Die Behandlung von Angststörungen mit der virtuellen Realität ist bereits weit verbreitet und geht auf Zeiten zurück, bevor markttaugliche HMDs verfügbar waren. Es gibt eine Vielzahl an Studien, die sich auf die Behandlung unterschiedlicher Ängste fokussieren. Ein Überblick über einige Therapieansätze gibt ein Artikel von Freeman et al. [94] der Universität Cambridge, in welchem viele wissenschaftliche Texte zum Thema Angststörungen und Virtual Reality zusammengefasst wurden, die interessante Ergebnisse hervorgebracht haben:

Nach diesem Artikel wird meist nicht nach der Ursache der Angst geforscht, sondern die spezifischen Ängste selbst therapiert. Dies lässt sich auch anhand weiterer wissenschaftlicher Arbeiten aufzeigen [93, 254, 264, 379]. Expositionstherapie ist in den häufigsten Fällen die Interventionsart der Wahl, bei welcher in den meisten Studien ein Therapeut anwesend ist.

Die bisherigen Studien sind meist von geringer Qualität, mit wenig überzeugenden, randomisierten, kontrollierten Studien, wobei es auch Studien mit höherer Qualität gibt (z.B [3, 32, 247]). Trotz unterschiedlicher Qualität bei den Studien lässt sich nach den Ergebnissen von Freeman et al. aussagen, dass die Wirksamkeit der VR-Therapie zur Behandlung von Angststörungen groß ist und eine Übertragbarkeit dieser positiven Effekte in die Realität erfolgt. Die bisherigen langfristigen Nachbeobachtungen konnten zeigen, dass dieser Effekt auch nach Jahren hinweg anhält. Ein zusätzlicher Vorteil ist das Anzeichen für geringe Abbrecherquoten dieser Behandlungsmethode. So scheint aus den bisher betrachteten Studien hervorzugehen, dass durch ein hohes Präsenzgefühl Angst hervorgerufen werden kann und sich somit die VR-Therapie zur Behandlung von Angststörungen als sinnvoll erweist.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch der wissenschaftliche Artikel von Diemer et al. [58], in welchem ebenfalls eine Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen analysiert wurde, wobei ein Großteil der Werke den Fokus auf Angststörungen legte. Insgesamt kamen sie zum Schluss, dass VR-Expositionstherapien psychologische Reaktionsmuster mit Ängsten auslösen können, wodurch die VR-Technologie zur therapeutischen Behandlung beitragen kann. Auch die aktuelleren Metaanalysen von Dellazizzo et al. [57] und Emmelkamp und Meyerbröker [77] kommen zu ähnlichen Ergebnissen und unterstützen die Aussagen von Diemer et al. und Freeman et al. hinsichtlich des Nutzens der virtuellen Realität im Kontext von Angststörungen.

Um diese Ergebnisse mit dem aktuellen Forschungsstand in verschiedenen Bereichen der Angststörungen abzugleichen, wurden im Folgenden aktuelle Forschungsarbeiten betrachtet, die ihren Fokus auf die Behandlung von spezifischen Angststörungen legen. Dazu wurde sich auf die Angst vor spezifischen Insekten und die soziale Angst beschränkt, da der Bereich der spezifischen Angststörungen sehr umfangreich ist und diese Störungen exemplarisch für weitere spezifische Angststörungen stehen können.

Spinnenphobie und Kakerlaken-Phobie

Eine in Deutschland sehr verbreitete Angststörung, ist die irrationale Angst vor Spinnen, die sogenannte Arachnophobie. Mehrere Quellen [6, 96, 98] sprechen davon, dass um die 5% aller Deutschen von dieser Furcht betroffen sind. Die neusten Forschungsergebnisse unterstreichen die zuvor allgemein genannten Forschungstendenzen der zuvor besprochenen Metaanalysen und zeigen auf, dass VR- und AR-Therapien ähnlich wirksam wie die traditionellen Behandlungsformen sind [131].

Auf Basis dieser Grundlage haben Kučera et al. [152, 167] eine eigene Anwendung konzipiert, um mit pädagogischen Methoden den Umgang mit der Angst zu verbessern. „PhoByeVR“ ist eine Anwendung, die sich an drei verschiedene Arten von Phobien richtet (Spinnenangst, Schlangenangst und Höhenangst) und durch vier Schwierigkeitsgrade versucht, den Umgang mit den angstausslösenden Reizen zu verbessern. Die Studien zu der Anwendung konnten zeigen, dass ein Mehrwert für die Patienten geschaffen werden konnte und eine solche Anwendung ein wirksames Instrument für den Umgang mit Phobien sein kann. Einen ähnlichen Ansatz verfolgte auch eine duale Abschlussarbeit [264, 266] an der Universität Siegen. Zur Behandlung der Spinnenangst wurde von Sayn und Schmidt eine Anwendung konzipiert, welche den Behavioral Approach Test (BAT) als Expositionstherapieansatz wählten, um Spinnenangst in der virtuellen Realität zu therapieren. Eine Besonderheit war die Einbeziehung der Konzepte des Modelllernens und der sozialen Unterstützung, die im Zuge der Therapie unterstützend eingesetzt werden. So sollten entweder die Schritte der Exposition, angelehnt an den BAT, begleitend mit einem Avatar durchgeführt werden, welcher die Schritte vorführt oder begleitet von virtuellen Avataren, die mit Anfeuerung den Betroffenen sozial unterstützen. Zu diesen Arbeiten gab es keine Evaluation mit Phobikern, jedoch wurden sie im Zuge eines Experteninterviews als sinnvoll bewertet.

Den BAT nutzten auch Miloff et al. [203] als Nachuntersuchungsmethode, um eine VR-Expositionstherapie, mit der in-vivo Therapie zu vergleichen. Auch hier wurde die Spinnenangst in den Fokus gestellt. Mit einer signifikanten Verringerung des Vermeidungsverhaltens und der verbesserten Selbstberichte über die Angst der Betroffenen nach der Behandlung stand die VRET (VR-Expositionstherapie) der in-vivo Therapie in nichts nach. Auch über langfristige Nachbeobachtungen (nach 3- und 12-Monaten) war die Spinnenangst weiter bleibend reduziert. Nach Miloff et al. kann so geschlossen werden, dass VRET sich als gerechtfertigte Methode zur Behandlung von spezifischen Angststörungen einsetzen lässt.

Ähnliche Ergebnisse ergeben sich für die erweiterte Realität. Ore et al. [227] beschreiben dies an einer beispielhaften AR-Anwendung als Lösung für die klassische Expositionstherapie. Hierzu haben sie eine mobile Applikation auf der Grundlage von Augmented Reality entwickelt, welche die Spinnen in verschiedenen morphologischen Formen visualisiert und für den Nutzer ergänzend zur Realität darstellt. Die Ergebnisse waren hierbei sehr vielversprechend, denn die Anwendung half den Betroffenen, ihre Phobie zu überwinden und harmlose Dinge nicht mehr als gefährlich wahrzunehmen. Darüber hinaus geben Ore et al. an, dass die Behandlung aus wirtschaftlicher und professioneller Sicht zugänglicher ist, was die Nutzung zusätzlich unterstützt.

Eine weitere AR-Applikation dieser Art testeten De Witte et al. [379], um zu erproben, ob in einer allgemeinen Bevölkerungsstichprobe Angst vor mehreren Tierarten durch die PHOBOS-AR-App [7] ausgelöst werden kann. Im ersten Experiment nutzten sie den BAT mit Tieren, vor welchen die Probanden zwar Angst empfunden haben, jedoch nicht phobisch waren. Die Ergebnisse zeigten, dass mit zunehmender Schwierigkeit die Reaktion anstieg, jedoch in Korrelation zu dem empfundenen Realismus. Auch der zweite Test, in welchem einer Gruppe an Anwendern Spinnen gezeigt wurden, kam zu ähnlichen Resultaten. Die Angstreaktionen während des BAT ließ sich durch die Hautleitfähigkeit messen und schien auch zu der Schwere der Angst der Probanden zu passen. Abschließend lässt sich durch die beiden Studien von De Witte et al. sagen, dass durch AR-Applikationen, welche Tiere zeigen, Angst ausgelöst werden kann, wodurch ein therapeutischer Ansatz möglich wird. Dies wiederum bestätigt ebenfalls die Erfahrungen von Ore et al., welche bereits eine erfolgreiche Therapieunterstützung durch AR möglich gemacht haben.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Cristina Botella et al. [31] bei ihren Untersuchungen mit ihrer eigenen AR-Anwendung zur Behandlung von Kakerlaken-Phobie. Neben der Wirksamkeit, welche sich in signifikanten Verbesserungen der Angst der Teilnehmer zeigte, blieb dieser Erfolg auch über 12 Monate erhalten.

Da die Augmented Reality die Möglichkeit bietet, den Reiz der Angst in das gewohnte Umfeld des Patienten zu projizieren, hatten sich auch Juan et al. [156] mit der Wirkungen von AR zum Thema Spinnen- und Kakerlaken-Phobie beschäftigt und zeigten ebenso positive Ergebnisse auf. Sie nutzten bekannte Situationen bei der Untersuchung der Angst. So platzierten sie die Spinnen und Kakerlaken mit Markern unter anderem auf Tischen, dem Boden und einem Kehrblech. Auch sie kamen zu dem Schluss, dass die Nutzung neuer Technologien wie AR die Angst der Patienten signifikant reduzieren könnte. Auch wenn diese Ergebnisse bereits älter sind, unterstützen sie die Erkenntnisse der neueren Studien.

Soziale Phobie

Die soziale Phobie zeichnet sich nach dem ICD-10 dadurch aus, dass Betroffene Furcht vor prüfender Beachtung der Gesellschaft zeigen, die zu Vermeidung sozialer Situationen führt [371]. Forscher und Kliniker scheinen nach einer anonymisierten Befragung von Ma et al. [181] sehr offen für virtuelle Therapien in diesem Bereich zu sein und große Vorteile in Virtual Reality und der Kombination von realen und virtuellen Elementen zu sehen (Mixed Reality). Diese Technologien könnten die Defizite traditioneller Therapie ausgleichen. Es braucht nach den Experten jedoch eine klare Standardisierung der Verfahren. Bouchard et al. [32] kam in einer eigenen Studie ebenfalls zu weiteren positiven Ergebnissen hinsichtlich der Behandlung von sozialen Angststörungen mit VR. In ihrer Studie verglichen sie eine in-vivo und in-virtuo Verhaltenstherapie gegenüber einer Warteliste. Sie kamen zum Ergebnis, dass die in-vivo und in-virtuo Verbesserungen gegenüber der Wartegruppe verzeichnen konnten. Darüber hinaus zeigte eine Nachbehandlung, dass die VR-Therapie wirksamer war und noch nach 6 Monaten bestehen blieb. Ebenfalls war sie für die Therapeuten deutlich praktischer, was dafür sprechen könnte, dass eine solche Therapiealternative Zukunft hat.

Arnfred et al. [10] erhoben in ihrer Forschungsarbeit ebenfalls die Erfahrungen von Therapeuten und Patienten mit VRET-Anwendungen, jedoch im Rahmen von Gruppentherapien. Hier wurden Herausforderungen wie Platz und Zeitbeschränkungen erkannt. Ebenfalls ergab sich ein Mangel an Interaktion in der verwendeten Anwendung. Trotzdem beschrieben alle Patienten den Einsatz von VRET als sinnvoll, um Techniken zu üben und einen Einblick in die angstbezogenen Gedanken und Verhaltensweisen zu gewinnen. Arnfred et al. kamen zu dem Ergebnis, dass Therapeuten eine Schulung der VRET benötigen. Zu diesem Thema veröffentlichte McMahon das Buch *Virtual Reality Therapy for Anxiety: A Guide for Therapists* [192], in welchem auf die Bedenken von Therapeuten zu VRET und die Chancen für ihre Klienten eingegangen wird.

Darüber hinaus kamen Arnfred et al. zu der Schlussfolgerung, dass es wichtig ist, dass die Betroffenen die Wahl der Umgebung so autonom wie möglich treffen sollten und dass die Interaktion innerhalb der virtuellen Umgebung ausreichend sein müssen. Die Interaktion ist, wie bereits im Kapitel 3.2.1 Immersion und Präsenz* besprochen, ein wichtiger Bestandteil der Präsenz und kann großen Einfluss auf die Wirkung der virtuellen Anwendung nehmen. Daher ist davon auszugehen, dass eine zu geringe Interaktion auch der Immersion schadet. Die Wichtigkeit der autonomen Wahl der virtuellen Umgebung wird noch einmal von den Ergebnissen von Gao et al. [100] unterstützt. Sie verglichen die

Stimmung von Nutzern bei unterschiedlichen Umwelttypen und kamen zu dem Schluss, dass es eine Korrelation zwischen der Präferenz des Nutzers und seiner Stimmung gab. Gefällt die virtuelle Umgebung dem Nutzer, kann sie vorteilhaft auf die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden wirken. So konnte auch festgestellt werden, dass die teilweise offenen Flächen am positivsten auf die Stimmung wirken konnten, wogegen geschlossene Grünflächen zum schlechtesten Ergebnis führten.

Eine VRET-Studie für soziale Angststörungen von Personen, die das Sprechen vor Publikum als Hauptangst benannten, wurde von Anderson et al. [3] durchgeführt. Die VR-Expositionstherapie wurde von den Forschern als wirksam eingestuft, wobei die Verbesserung des Krankheitsbildes auch über ein Jahr nach der Behandlung anhielt. Nach Anderson et al. scheint eine virtuelle Exposition genauso wirksam wie die in-vivo Gruppen-Expositionstherapie. Sie weisen jedoch darauf hin, dass eine größere Stichprobe benötigt würde, um die Ergebnisse besser statistisch kontrollieren zu können.

Sowie zur Expositionstherapie gibt auch positiv gestimmte Studien zum Bereich der kognitiven VR-Verhaltenstherapie zur Behandlung von sozialen Angststörungen. *GameChange* [93] ist eine erfolgreich umgesetzte kognitive VR-Therapie zur Behandlung von Agoraphobie, der Angst vor Menschenmengen und der Angst vor sozialen Situationen. Diese Anwendung ermöglicht es, Situation in der virtuellen Realität zu erleben, welche betroffene Personen in der Realität meiden. Begleitet von einem virtuellen Coach können insgesamt sechs verschiedene Szenarien gewählt werden, in denen die Patienten lernen, die Situationen zu bewältigen. Hierbei steigt der Schwierigkeitsgrad abhängig vom Szenario. Eine große klinische Studie mit 346 Teilnehmern, welche von Freeman et al. [95] veröffentlicht wurde, konnte durch diese Anwendung eine signifikante Verringerung von Vermeidungsverhalten und Stress in Alltagssituationen im Vergleich zur üblichen Behandlung allein feststellen.

4.3.2 Essstörungen

Essstörungen sind durch pathologische Essgewohnheiten, das Streben nach idealen Körperformen und einer tendenziellen Überschätzung des Körpergewichts gekennzeichnet. Anorexia nervosa (AN), Bulimia nervosa (BN) und Körperbildstörungen (BID) zählen heutzutage zu den schwersten psychischen Störungen mit einem erhöhten Sterberisiko [66, 287]. Durch diese Relevanz wird schon seit vielen Jahren an Therapieansätzen zur Behandlung von Essstörungen geforscht. Die Paper von Ciałyńska et al. [42] und Wiederhold et al. [372] fassen die Entwicklung der VR-Therapie zum Thema Essstörungen der letzten Jahre ausführlich zusammen:

VR-Expositionstherapie

Das Selbstbild ist für viele Betroffene ein Richtmaß ihres Körpergewichtes, wobei es häufig zu Unterschieden zwischen der Wahrnehmung des Patienten und dem tatsächlichen Körperbild gibt. Die aktuellen Paper zu diesem Thema [144, 210, 238, 243] untersuchten, ob eine Körper-Expositionstherapie erfolgreich eingesetzt werden kann, um die Körperbedenken gezielt zu beeinflussen. Dabei kamen sie zu unterschiedlichen Ergebnissen. Auch wenn nicht alle Versuche die BID wie gewünscht beeinflussen konnten, gaben alle Forscher an, dass sie Potenzial in der Technologie sehen, es jedoch weitere Forschungsarbeit benötigt. Neben dem Fokus auf die BID, wurden auch Anwendungen konzipiert, die zur Behandlung von AN und BN dienen sollen. Durch die Illusion eines anderen Körpers in der virtuellen Realität soll sich insbesondere auf die Emotionen gestützt werden. Durch eine „Body-Swapping-Illusion“, also das Austausch des virtuellen Körpers mit einem anderen, konnte das gestörte Erleben des Körpers von AN Patienten verändert werden [159].

VR-CET-Intervention

Die Cue-Expositionstherapie (CET) wird üblicherweise bei Suchtproblematiken eingesetzt, wobei beispielsweise einem Alkoholiker Alkohol zum Anschauen und Riechen vorgesetzt wird, ohne dass dieser konsumiert werden darf [301]. In Bezug auf Essstörungen wird die CET für Betroffene von Bulimia nervosa oder Binge-Eating-Störungen eingesetzt. Durch die Bewertung der Patienten von ausgewählten Lebensmitteln, die eine Zunahme der Angst und des Verlangens verursachten, können sich die Betroffenen durch die VR in Lebensbereichen wie dem Esszimmer, einer Mensa oder Küche in einer CET auseinandersetzen. Das bietet den Vorteil, dass Betroffene in real wirkenden Umfeldern konfrontiert werden können und verschiedenstes Essen für die Konfrontation bereitsteht. Dies haben

sich auch einige Forschungsarbeiten zunutze gemacht, welche die CET in die virtuelle Realität übertragen haben.

Gutiérrez-Maldonado et al. [122] konnten nach ihrer Behandlung mit ihrer eigenen VR-CET-Anwendung ein verringertes Verlangen nach Nahrung feststellen, auch wenn der Unterschied zu nicht-immersiven Systemen nicht signifikant besser war. Dennoch sehen sie das VR-System als praktikable Option, wenn die Kosten reduziert und die Benutzerfreundlichkeit erhöht werden würde. Nameth et al. [213] kamen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Bei ihnen sanken die Binge-Episoden signifikant. Zusätzlich stieß die virtuelle Therapie bei den Teilnehmern und Therapeuten auf hohe Akzeptanz. Jedoch handelt es sich hierbei um eine kleine Pilotstudie, dessen Ergebnisse jedoch von den Übersichtsarbeiten von Emmelkamp und Meyerbröker [77] unterstützt werden. Auch sie konnten zunehmend Belege finden, die die VR-CET-Intervention bei Sucht- und Essstörungen als wirksam einstufen.

Alternative VR-Therapien

Es gibt noch einige weitere Therapieansätze, welche interessante Ergebnisse offenbaren. So konnte die Studien von Matsangidou et al. [190] aufzeigen, dass eine ortsunabhängige Psychotherapie dazu beitragen kann, Probleme wie Warte- und Reisezeiten zu vermeiden und damit flexibler eingesetzt werden könnte. Die Nutzung von Multi-User-Virtual-Reality-Systems (MUVR) scheint therapeutisch sinnvoll und sich positiv auf die Betroffenen auszuwirken.

Manasse et al. [188] konnten mit ihrer Studie einen Beweis einer möglichen Reduktion von Essstörungssymptomen darlegen. In ihrer Studie konnten sie durch eine VR-Intervention Betroffenen die Kontrolle über das Essverhalten zurückgeben, wodurch es insgesamt zu einer starken Abnahme an Essanfällen kam.

Abschließend lässt sich nach Ciążyńska et al. [42] sagen, dass die derzeitigen guten Ergebnisse mit Virtual Reality im Bereich von Essstörungen Potenzial für weitere Interventionen bieten, es jedoch weitere Forschungsarbeiten benötigt, um die Ergebnisse zu festigen.

4.3.3 Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS)

Die Behandlung von posttraumatischen Belastungsstörungen mit der Virtual Reality geht bereits auf Zeiten vor den 2000er zurück [255]. Hier wurden bereits mögliche Verbesserungen für den Gemütszustand der Betroffenen durch die virtuelle Realität festgestellt. Diese Ergebnisse werden von aktuellen Forschungsarbeiten weitestgehend unterstützt [59, 158, 176, 247]. Der derzeitige Forschungsstand untersucht insbesondere die VR-Expositionstherapie als Behandlungsstandard bei PTBS. In mehreren Sitzungen werden die Betroffenen ihren Trauma-Erinnerungen ausgesetzt, um die PTBS und damit einhergehenden Angstsymptome zu lindern. Alle genannten Studien kamen zu dem Schluss, dass eine VR-Exposition signifikant bessere Ergebnisse liefern als mögliche Wartegruppen, sowohl bei der Reduktion von PTBS- und Angstsymptomatiken, als auch bezogen auf die Selbstberichte der Patienten. Diese Verbesserungen bleiben auch bei Nachuntersuchungen bestehen, wodurch davon auszugehen ist, dass sie langfristig anhalten. Dies scheint sich auch in der galvanischen Hautreaktion (Hautleitfähigkeit) niederzuschlagen. Nach Katz et al. [158], scheint diese sich in Korrelation zu den PTBS- und Angstsymptomen zu verringern. Auch die Herzrate kann genutzt werden, um die Verbesserungen durch VRET und Prolongierte Exposition (PE) physiologisch sichtbar zu machen [176].

Reger et al. [247] beobachteten bei Nachuntersuchungen, dass die Prolongierte Exposition jedoch zu einer signifikant größeren Symptomreduktion führte als die VRET. Auch wenn beide zu signifikanten Verringerung der PTBS-Symptome beitragen, ist die VRET der PE nicht überlegen.

Difede et al. [59] kommen zu einem anderen Ergebnis. Zwar unterliegt die VRET der PE, jedoch nur, sofern die Teilnehmer nicht an depressiven Störungen leiden. Depressive Teilnehmer scheinen mehr von der virtuellen Exposition in der VR zu profitieren. Demnach könnte eine komorbide Depression ein besonderer Faktor bei der Wahl der Therapieart und ausschlaggebend für den Erfolg der Behandlung sein. Erklärt wurde sich das Ganze von Difede et al. dadurch, dass die Nutzung von VR und das Navigieren in einer virtuellen Umgebung dazu beigetragen hat, die Verhaltensaktivierung zu erleichtern. Für Patienten mit Depressionen könnte die Nutzung von VR und das Eintauchen in eine virtuelle Umgebung aufgrund ihrer veränderten Belohnungsverarbeitung besonders wertvoll oder anregend sein. Möglicherweise bedürfen sie nach stärkerer Stimulation zur Überwindung der negativen Erfahrungen.

Die erfolgreiche Nutzung von VRET zur Behandlung von posttraumatischen Belastungsstörungen lässt sich auch in aktuellen Metaanalysen wiederfinden [77, 81, 166, 168]. Insgesamt scheinen die virtuellen Anwendungen die Verarbeitung von traumabezogenen Erinnerungen zu unterstützen und das allgemeine Wohlbefinden der Patienten zu steigern. Kuhn et al. [168], Eshuis et al. [81] und Kothgassner et al. [166] kommen nach Betrachtung einer Vielzahl weiterer Forschungsarbeiten ebenfalls zum Schluss, dass die VRET der Wartelistengruppe signifikant überlegen ist, jedoch nicht zu besseren Ergebnissen führt als die aktiven Behandlungsbedingungen wie durch die Prolongierte Exposition. Dennoch erkennen auch Kuhn et al. die Vorteile einer VR-Therapie zur Behandlung von PTBS gegenüber den traditionellen Methoden an. Durch die multisensorischen Stimuli könnte nach Kuhn et al. die emotionale Beteiligung der Betroffenen verbessert werden, was die Verarbeitung von traumabezogenen Erinnerungen unterstützen kann. Ebenfalls kann die VRET Patienten eine sichere Umgebung bieten, in der sie unter Anleitung eines Therapeuten die Exposition kontrollieren können. Dadurch könnten sie lernen, wie sie mit Angst auslösenden Situationen umgehen können, bevor sie in der realen Welt damit konfrontiert werden. Dies ist insbesondere für die Patienten interessant, bei der den die traditionellen Therapieansätze versagt haben.

Einen multisensorischen Ansatz, der insbesondere für diese Arbeit spannend ist, stammt von Smys et al. [288]. Diese haben eine Anwendung zur Behandlung von PTBS konzipiert, die auf dem Markt erhältliche Hardware nutzt. Mithilfe von VR-Handschuhen und einem Laufband für die virtuelle Realität soll so die Behandlung weiter verbessert werden. Jedoch sind die Ergebnisse derzeit nicht sehr aussagekräftig, und die Anwendung wurde noch nicht zur Behandlung von Betroffenen eingesetzt.

4.3.4 Zwangsstörungen (OCD)

Verwandt mit den bisher besprochenen Phobien sind die sogenannten Zwangsstörungen. Auch hier versuchen die Betroffenen Angst durch gewisse Verhaltensweisen zu reduzieren. Anders als bei den Phobikern geschieht dies nicht passiv durch ein Vermeidungsverhalten, sondern durch absichtliche, sich wiederholende Verhaltensweisen, welche die unerwünschten und zwanghaften Angstgedanken eindämmen. Dieses Verhalten wurde durch die COVID-19-Pandemie bei einigen Personengruppen weiter verstärkt [101]. Die virtuelle Umgebung ermöglicht es den Betroffenen, sich mit ihren Zwängen zu beschäftigen, ohne eine direkte Gefahr eingehen zu müssen. So konnten einige Forschungsarbeiten bereits aufzeigen, dass Virtual Reality-Anwendungen Zwangsstörungssymptome auslösen können. Entweder durch ein VR-Spiel wie bei Bennekom et al. [355] oder durch gezielte Aufgaben wie bei Francová et al. [90]. Dies wollten sich auch Torrão et al. [338] zunutze machen und entwickelten eine Anwendung für Jugendliche und junge Erwachsene, die bisher jedoch nur von Fachleuten evaluiert werden konnte.

Die Studie von Dua et al. [72] zeigt, dass die Virtual Reality zur Verhaltenstherapie bei Zwangsstörungen eingesetzt werden könnte, es dazu jedoch mehr Anwendungen benötige, so wie es bereits um 2009 von Kim et al. [163] beschrieben wurde.

Miegel et al.[201] und Javaherirenani et al. [153] konnten 2022 ihre Ergebnisse zu der Verwendung von VR zur Behandlung von Patienten mit Zwangsstörungen veröffentlichen. Sie bedienten sich der VR-Expositionstherapie zur Reaktionsprävention (VRETRP), die den Patienten dabei helfen soll, die ungerechtfertigten Angstsignale zu unterdrücken, die ihr zwanghaftes Verhalten auslösen. Beide Studien zeigten, dass die VRETRP für die Behandlung von Patienten mit OCD eine mögliche Ergänzung zu den bisherigen traditionellen Therapien sein könnte, insbesondere da eine medikamentöse Behandlung bei dieser Erkrankung sehr schwer ist. Jedoch war es in beiden Fällen nicht möglich, die allgemeine Wirksamkeit von VRETRP zur Reduktion von Zwangsverhalten festzustellen. Dies liegt zu einem an den kleinen Probandengruppen und zum Anderen an der geringeren Forschungsspanne.

Auch AR kann genutzt werden, um Zwangsstörungssymptome hervorzurufen. Das bewiesen Garcia-Batista et al. [101] in ihrer Studie, wobei die verschiedenen verwendeten virtuellen Objekte unterschiedliche Effektstärken aufwiesen. Somit müssen die richtigen Objekte innerhalb der Therapie verwendet werden, um den gewünschten Effekt zu erzeugen und das Zwangsverhalten hervorzurufen.

4.3.5 Substanzabhängigkeit

Die Substanzabhängigkeit kann verschiedene Auslöser haben. Zur Behandlung werden unterschiedliche psychologische Therapieansätze genutzt. Einige dieser traditionellen Ansätze wurden in den letzten Jahren in die virtuelle Umgebung übersetzt. Dazu hat das Team unter Klucken, Machulska und Eiler [182, 320], in dem Projekt *ANTARES* den *Approach Avoidance Task* (AAT) in die virtuelle Realität übertragen, um suchtbezogenes Verhalten zu reduzieren. Bei dem AAT sollen die Patienten anhand spezifischer Marker, wie die Kippung des Bildes oder einer farblichen Markierung, Objekte entweder zu sich hin oder von sich wegbewegen. Hierbei werden suchtbezogene Objekte so markiert, dass sie immer weggeschoben werden sollen, ohne dass der Patient darüber informiert wird. Dadurch wird das Unterbewusstsein darauf konditioniert, diese suchtbezogenen Objekte zu vermeiden. Standardmäßig wird dieses AAT-Training an einem Computer mit einem Joystick umgesetzt, wobei jedoch die Abbruchquote sehr hoch ist. Daher wurde dieser Vorgang in die virtuelle Realität übertragen, in welchem farblich markierte 3D Objekte per Controller in zwei unterschiedliche Kisten einsortiert werden, eine bei dem Patienten und eine entfernt von dem Patienten. Bei einer groß angelegten Studie [182] mit 108 Teilnehmern konnte aufgezeigt werden, dass die VR-Applikation den täglichen Zigarettenkonsum signifikant reduzieren konnte. Dabei kam es durchschnittlich zu einer Reduktion des Konsums um fast 50 %. Neben der Zigarettensucht adressiert die Anwendung von Eiler et al. auch die Behandlung von Alkoholsucht. In einem weiteren Paper [74] wurde auf die möglichen Effekte einer immersiven Umgebung eingegangen, die alkoholbezogene Elemente beinhaltet. Ergänzend dazu ist die wissenschaftliche Arbeit von Faust et al. [208] zu nennen, die in ihrer VR-Simulation ebenfalls den Schwerpunkt auf alkoholbedingte Suchterkrankungen legte. Anstatt des *Approach-Avoidance-Task* wurde eine Expositionssimulation genutzt, wobei das Erlernen von Bewältigungsstrategien im Zentrum stand. Besonders wichtig sind nach beiden Arbeiten die Qualität der Immersion und die Benutzerfreundlichkeit der Anwendung. Jedoch haben hier bisher keine ausreichenden Studien stattgefunden, welche das wissenschaftliche Potenzial evaluieren. Hanshans et al. [40] verfolgten einen sehr ähnlichen Ansatz zu Faust et al.. Exposition und Erlernen von Bewältigungskompetenzen durch die virtuelle Realität sind auch hier die maßgeblichen Ziele gewesen. Auch in ihrer Arbeit besteht derzeit erst ein Proof of Concept, jedoch zeigt dieses bereits die Tendenz auf, dass die virtuelle Therapie mit vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand umgesetzt werden könnten. Darüber hinaus wird auch das Thema der Haptik behandelt, welche in dieser Anwendung noch fehlt, aber eine weitere Möglichkeit bei der Behandlung von Suchtkranken eröffnen könnte.

Die Übersichtsarbeit von Tsamitros et al. [339] unterstützt die bisher aufgezeigten Ergebnisse. So können nach ihnen VR-Techniken sinnvoll eingesetzt werden, um *Craving* zu erzeugen, also das Verlangen nach dem Suchtmittel, welches mit VR-Behandlungen dann verringert werden könnte. Auch könnten bestehende therapeutische Ansätze durch die Virtual Reality verbessert werden, ähnlich wie im zuvor erwähnten Projekt *ANTARES* von Klucken und Team. Tsamitros et al. sehen Ähnlichkeiten zwischen der Weiterbildung bei Substanzabhängigkeit und Expositionstherapie bei Angsterkrankungen und vergleichen die bisherigen Ergebnisse miteinander. Nach ihnen lassen sich insbesondere schwierige soziale Situationen in der virtuellen Umgebung besser nachbilden als im Labor, wodurch eine Nachbildung öffentlicher Räume wie in der Arbeit von Eiler et al. [74] sinnvoll erscheint. Auch Langer et al. [170] kommen in ihrer Übersichtsarbeit zu dem Ergebnis, dass die VR-Cue-Reaktivität mit der Schwere der Abhängigkeit korreliert, jedoch sind die Ergebnisse der betrachteten Arbeiten sehr widersprüchlich. So gibt es nach Langer et al. bisher keine VRET-Pilotstudien mit einem überzeugenden Behandlungseffekt. Andere VR-Interventionen, welche sich mit unterschiedlichen Lernparadigmen beschäftigen, zeigten dahingehend positive Ergebnisse. Insgesamt kamen die Wissenschaftler dort jedoch auch zum Ergebnis, dass der klinische Nutzen bei der Bewertung der Therapie mit qualitativ hochwertigen Studien noch geklärt werden muss.

Machulska et al. [183] befassen sich in ihrem Artikel ebenfalls mit Psychotherapie-Anwendungen in der Virtual Reality und warum diese bisher noch nicht in den täglichen Praxisalltag gefunden haben. In diesem Beitrag wird unter anderem die Wirkung von Cognitive Bias Modification zur Suchtbehandlung betrachtet. Anders als Langener et al. kommen Machukska et al. durch Betrachtung von Metaanalysen zum Schluss, dass die Effektstärken von in-virtuo Therapien vergleichbar zu den in-vivo Therapien sind und ein Transfer in die reale Welt stattfindet. Jedoch sind auch hier negative Auswirkungen benannt. Die unzureichende Individualisierung und fehlende Akzeptanz der neuen Technik können in Abbrüchen und Verschlechterungen der Symptomatik münden. Nach ihnen werden sich einige Nachteile durch die Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit und die inhaltlichen Anpassungen der VR-Anwendungen auflösen können. Trotz dieser Probleme halten sie die neue Technik für weiterhin vielversprechend.

4.3.6 Erhalt der kognitiven Fähigkeiten

Das Merken und Erinnern von Informationen ist ein wesentlicher Bestandteil des Lebens. Krankheiten wie Demenz nehmen darauf Einfluss und können den Merkprozess und kognitive Fähigkeiten so stark einschränken, dass eine Pflege für Betroffene unabdinglich wird. Derzeit gibt es zwar keine Heilung, jedoch können die Symptome reduziert und der Verlauf verlangsamt werden [107]. Insbesondere ist der Erhalt der kognitiven Fähigkeiten wichtig, da sonst psychische Erkrankungen begünstigt werden, wie bereits im Kapitel 3.2.5 „Kognitive Leistungsfähigkeit“ detailliert besprochen wurde.

Auch in diesem Themengebiet sind Tests- und Therapeimöglichkeiten in die virtuelle Realität übertragen worden. Sobieraj et al. [218] untersuchten mit dem Multiple Errands Test (MET) die Auswirkungen von Alzheimer auf alltägliche Aufgaben und dem Rückgang von kognitiven Fähigkeiten hinsichtlich dieser. Hierbei wurden Effekte bei der Ausführung von ungewohnten Küchenaufgaben festgestellt. Daraus resultierte die Idee, diese Aufgaben in die virtuelle Realität zu übertragen, um die Art der Fehler festzustellen und gleichzeitig die Frustration der Patienten zu verringern. Zu diesen Zwecken wurde die Küche aus der in-vivo Therapie realitätsgetreu in der virtuellen Realität nachgebildet. Die Nachbildung von realen Szenarien und die Testung von alltäglichen Aufgaben innerhalb einer virtuellen Realität kann nicht nur zu Therapiezwecken genutzt werden, sondern auch zur Früherkennung solcher Gedächtnis betreffenden Krankheiten. Tebepah Tariuge [321] hat hinsichtlich dieser Idee eine virtuelle Anwendung für das *Google Cardboard* entwickelt, in der in Kombination mit künstlicher Intelligenz Aufgaben bewältigt werden müssen, wobei mögliche Fehler als Indikator einer potenziellen Alzheimererkrankung fungieren. Die Patienten empfanden die KI-basierte Assistenz als hilfreich, was dafür sprechen könnte, dass KI-basierte Assistenzsysteme innerhalb von Therapien sinnvoll genutzt werden könnten.

Aktuelle Studien [47, 139, 184, 185] zeigen, dass Lernanwendungen von einer immersiven VR profitieren können. Die Immersion im Rahmen von Lehranwendungen kann nämlich neben der Erhöhung des Vergnügens und der Konzentration auch den Lernzuwachs signifikant erhöhen, sofern das Design gut gewählt wurde. Demnach bietet auch dieser Bereich großes Potenzial. In der Studie von Mahmoud et al. [185] wurde der Lerngewinn durch die Nutzung von immersiven bzw. nicht-immersiven VR-Methoden miteinander verglichen. Die Gruppe, welche die immersive Anwendung nutzte, schnitt im Quiz signifikant besser ab als die Gruppe, welche eine nicht-immersive VR-Anwendung nutzte.

Aber nicht nur die Nutzer können von solchen Anwendungen profitieren. Wie auch bereits in anderen Therapiegebieten angesprochen, steht ebenfalls die Entlastung der Therapeuten im Fokus. Gerade der Umgang mit von Demenz betroffenen Personen kann das Personal langfristig belasten. Appel et al. [8] erfassten die Erfahrungen von Therapeuten mit VR-Therapien für Bewohner mit Demenz. Hierbei gaben die Therapeuten an, dass ihnen der Umgang mit der Technik leicht fiel und auch, dass die Therapiesitzungen physisch und emotional für sie einfacher zu handhaben waren. Lediglich die unzureichende Zeit, die für die Durchführung der Forschung eingeplant war, wurde bemängelt. So würden sich Therapeuten eine bessere Unterstützung in Bezug auf neue Interventionsmethoden wünschen. Darüber hinaus eignete sich die VR-Ausrüstung nicht für alle Patienten. Gerade bei gebrechlichen Personen sahen die Therapeuten davon ab, die Technik zu nutzen. Durch die kleine Stichprobe konnte auch hier keine allgemeine Aussage getroffen werden.

4.4 Aktueller Stand kommerziell verfügbarer haptischer Technologie

Neben den bereits besprochenen Forschungsarbeiten, die sich mit eigens konzipierter haptischer Hardware befassen, gibt es ebenfalls eine ganze Fülle von Haptikmodulen, die auf dem Markt verfügbar sind oder kurz davor sind, kommerziell erwerbbar zu werden. Durch die Möglichkeit, von jedem erworben zu werden, wurde im Rahmen der Arbeit entschieden, sich auf diese Arten von Hardware zu spezialisieren. Dies erfolgte nicht nur wegen der einfachen Zugänglichkeit, sondern auch für eine Übertragbarkeit der hier beschriebenen Ansätze in den derzeit existierenden Therapiealltag.

Hierzu wurde ein Katalog erstellt, welcher haptische Elemente vorzugsweise für den Gebrauch in VR oder AR auflistet und einen Gesamtüberblick über aktuell bestehende oder bald erscheinende Hardware sowie Konzepte einmal im Detail vorstellt. Diesbezüglich wurden Tabellen entwickelt, welche eine Übersicht über die herausgearbeitete Technik und ihre Spezifikationen gibt. Diese kann von anderen Forschern und Entwicklern als Hilfestellung genutzt werden und bei der Auswahl von haptischer Technologie unterstützen.

Ziel ist es, einen allgemeinen Überblick über die unterschiedlichen Ansätze von Haptik zu schaffen, da sich die Übertragung der Haptik auf den menschlichen Körper durch verschiedene Hardwareansätze unterscheidet. Beispielsweise können Vibrationen, aber auch Elektrizität sowie Widerstände verschiedenste Empfindungen auf der Haut simulieren. Ebenfalls kann die Hardware auf ganz unterschiedliche Körperbereiche abgestimmt sein. Demnach gibt es haptische Handschuhe oder sogar ganze Anzüge, welche in der Lage sind, Reize über den gesamten Körper auszusenden.

4.4.1 Haptische Handschuhe

Eine Möglichkeit, haptische Wahrnehmung auf den Körper des Nutzers zu übertragen, sind haptische Handschuhe. Hierbei liegt der Fokus der Haptik auf den Händen, Fingern und Fingerspitzen. Dies bietet sich an, da diese unbehaarten Stellen des Körpers besonders sensitiv gegenüber der Reizwahrnehmung sind [19]. Des Weiteren werden die Hände am häufigsten innerhalb von Virtual Reality, aber auch Augmented Reality für die Interaktion benötigt, bisher jedoch meist in Verbindung mit einem Controller oder durch Handerkennung mithilfe von Kameras. Daher ist es nicht verwunderlich, dass viele Entwickler auf Datenhandschuhe setzen und diese mit Haptik verbinden. So kann in den meisten Fällen ein Handtracking gemeinsam mit verschiedensten haptischen Eindrücken verknüpft und die Interaktion innerhalb der Anwendungen so natürlich wie möglich gestaltet werden, nämlich mit den eigenen Händen, was dazu führen könnte, dass die Immersion begünstigt und dadurch gesteigert werden kann.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die haptischen Handschuhe, welche in den letzten Jahren konzipiert und auf dem Markt etabliert wurden. Einige von diesen Handschuhen befindet sich derzeit noch im Vorverkauf, bei anderen Modellen steht der Eintritt in den Markt noch aus. Dennoch wurde versucht, alle wichtigen Aspekte und Unterschiede der Handschuhe so detailliert wie möglich herauszuarbeiten. Insbesondere die Details der Haptik und des Handtrackings sind in diesem Fall von besonderer Bedeutung, da diese in einer möglichen virtuellen Anwendung nur in Kombination effektiv genutzt werden können.

Name	Haptical Feedback Type	Specific Haptics Per Hand	Tracking Sensoren	Sensor Performance	Size	Program-language	Developer Support	Demo	Communication	Battery Duration	Weight	Price
Bebop-Sensors Forte Data Glove	Auditiv Haptic	6 non-resonant audio rate frequency response from 100 Hz to 2000 Hz.	9-degree IMU, 14-bit accelerometer, 16-bit triaxial gyroscope	Sample rate: 200 Hz/Latency: 150 frames per second	One size	Java, Python, C++, C#	Unity, Unreal, Python	yes	USB 2.0 and Bluetooth and BLE 5	6-8 hrs	103.5g	Upon request
Contact CI Force-Feedback Gloves Maestro	Force Feedback + Vibrotactile Haptic	5 force feedback motors + 5 vibration motors	Compatible with: Camera based tracking systems	Upon request	One size	C++, C#	Unity, Unreal	yes	BLE 5	>1 hr	N/A	\$3,750
Dexmo Haptic Feedback Exoskeleton Gloves	Force Feedback + Vibrotactile Haptic	5 vibration actuators + force feedback up to 5 kg,cm	11 degrees of freedom hand motion	Latency of 20-50ms	One size	C#	Unity	N/A	2.4GHz wireless modules	6-8 hrs	300g	Upon request
EXOS Wrist DK2	Force Feedback	2 force feedback motors 20 Ncm	Compatible with: VIVE Controller or Oculus Touch	Upon request	One size	C#	Unity	yes	Wiredvia USB or wireless via Wi-Fi	2.5h	350g	Upon request
EXOS HandUnit	Force Feedback	6 force feedback Futaba RS303MR motors	N/A	Upon request	One size	C#	Unity	yes	via USB connection	N/A	390g	~\$650
HaptX Gloves DK2	Force Feedback + Microfluidic Haptic + Thermal Feedback	Tactile actuators, 40lb force feedback, 130 tactile points, thermal feedback	30 degrees of freedom (DoF)	Upon request	4 Sizes	C++, ROS	Unity, Unreal, Steam-VR	yes	Cable + Airpack (special computing unit)	3 hrs	454g	Upon request
HaptX Gloves G1	Force Feedback + Microfluidic Haptic	Tactile actuators, 40lb force feedback	30 degrees of freedom (DoF)	Upon request	4 Sizes	C++, ROS	Unity, Unreal	N/A	Cable + Airpack (special computing unit)	3 hrs	N/A	~\$549
LucidGloves	Force Feedback	5 force feedback with 9g servo motors	Compatible with: HTC VIVE	N/A	One size	C#	Unity	yes	USB Serial, Bluetooth	N/A	N/A	~\$60
MANUS Prime X Haptic VR	Vibrotactile Haptic	5 haptic modules	9 DoF IMU for each finger + Compatibel with VR Controller	Sample rate: 90Hz Latency: < 5ms	2 Sizes	C#	Unity	yes	USB Type-C, bluetooth 2.4 GHz	5 hrs	70g	~\$4,340
Noiton Hi5	Vibrotactile Haptic	1 Vibration feedback on wrist	9-DoF IMU	Sample rate: 180Hz Latency <5ms	Sizes: S/M	C++, C#	Unity Unreal	yes	USB 2.0, Bluetooth 2.4 GHz	>3 hrs	105g	\$999
Plexus VR Glove	Vibrotactile Haptic	5 tactile actuator	21 Degrees of freedom per hand	Refresh rate: 180Hz	One size	C++, C#, Python	Unity, Unreal	N/A	Wireless: 2.4GHz Custom Low Latency	2-3 hrs	N/A	\$249
SenseGlove Nova	Force Feedback	4 force feedback motors up to 20N of force	9 Axis orientation sensor + 4 sensors for flexion and extension	Refresh rate: 60Hz	One size	C++, C#	Unity Unreal	N/A	2.4GHz wireless serial communication	2-3 hrs	320g	~\$5419
TactGlove DK1	Vibrotactile Haptic	6 LRA motors	Compatible with: Camera based tracking	N/A	4 Sizes	N/A	N/A	N/A	Bluetooth	3.5 hrs	N/A	\$299
VRgluv	Force Feedback + Vibrotactile Haptic	10 pounds of active Force Feedback, vibration	3 DoF tracking for each finger	N/A	One size	C++, C#	Unity, Unreal, SteamVR	N/A	Low-latency Bluetooth	N/A	N/A	\$299

Bebop Sensors Forte Glove

Der *Bebop Sensors Forte Glove*² oder auch *Forte Data Glove* [16, 17] von *BeBop Sensors* ist ein haptischer Handschuh, welcher Fingertracking und die Verwendung von komplexen Vibrationsmustern kombinieren möchte, um einen realistischen, taktilen Eindruck der virtuellen Welt zu schaffen (siehe Abbildung 14a). Bei diesen Handschuhen liegen die haptischen Elemente auf den Fingerspitzen selbst, wobei jeder einzelne Finger mit einem speziellen nicht-resonanten Aktuator versehen wurde, ebenso wie die Handinnenfläche. In Kombination mit anderen Trackingsystemen kann mit der Finger- und Orientierungssensoren der *BeBop Sensors* Handschuhe die Position der Hand im Raum bestimmt werden. Die mögliche Akkudauer wird mit sechs bis acht Stunden angegeben. Die Firma selbst präsentierte das Gerät als den weltweit ersten exklusiven haptischen Handschuh für die *Meta Quest* an, zeigte jedoch ebenfalls auf ihrer Website die Verwendbarkeit mit der *HTC VIVE* [15, 16]. Durch eine große Bandbreite an unterstützten Entwicklungsplattformen wie *Unreal*, *Unity*, *C++* und *Python* könnte der Handschuh in vielerlei Anwendungen integriert werden, wobei eine Dokumentation und Demoanwendungen den Einstieg erleichtern sollen. Mittlerweile sind alle Webseiten offline, wodurch davon auszugehen ist, dass der Handschuh vorerst nicht auf dem Markt erscheinen wird (Stand: 08.2023).

Contact CI Force-Feedback Gloves Maestro EP

Die Grundidee der haptischen Handschuhe *Maestro EP* [49, 149] von *Contact CI* ist das Nachbilden der menschlichen Anatomie mithilfe von elektrischen Sehnen und Muskelatruppen, die die Finger wie echte Muskeln zurückziehen. Neben der daraus resultierenden Kraftrückkopplung befinden sich ebenfalls vibrotaktile Elemente in den Fingerspitzen. Durch über 100 spezifische Vibrationseffekte sollen den Entwicklern zufolge verschiedene Beschaffenheiten und Oberflächen simuliert werden können. Die Kabel sind hierbei in den Handschuh eingelassen und werden durch das Modul am Handgelenk gesteuert. Durch die Kompatibilität mit firmeneigenen Systemen kann auch ein Handtracking ermöglicht werden. Dieses kann dann durch die von *Contact CI* angebotene Schnittstelle in *Unreal* und *Unity* übertragen und verwendet werden. Die Besonderheit liegt in der Kombination aus vibrotaktilem Feedback und Force Feedback. Jedoch ergibt sich aus einem Bericht [220], dass das Anziehen der Handschuhe eine gewisse Sorgfalt erfordert und im Bereich der Vereinfachung und Haltbarkeit noch Bedarf besteht. Dem wurde mittlerweile auch in der neuen Version der Handschuhe nachgekommen. Die aktuelle Version des *Maestro EP* kann in Abbildung 14b gesehen werden.

²Namen der Firma kursiv, Namen der Hardware nicht-kursiv für bessere Lesbarkeit

DextaRobotics Dexmo Haptic Feedback Exoskeleton Gloves

Eine weitere Variante von haptischen Handschuhen, die vibrotaktilen Feedback und Force Feedback vereinen, wurde von der Firma *DextaRobotics* entwickelt. Dieses Unternehmen hat den haptischen Handschuh Dexmo Haptic Feedback Exoskeleton Glove [251, 289] auf den Markt gebracht. Der für VR und AR optimierte Datenhandschuh kann neben haptischem Feedback auch die Handbewegungen in die virtuelle und erweiterte Realität übertragen. Dazu wird ein Exoskelett genutzt, welches über den Fingern liegt und mit dem Force Feedback Widerstände der zu greifenden virtuellen Objekte erzeugt. Das Verhalten und die Steifheit der Objekte können durch das unternehmenseigene SDK *LibDexmo* bestimmt werden. Dabei ist der Handschuh mit Systemen wie beispielsweise der *Meta Quest*, der *HTC VIVE* oder auch der *HoloLens* kompatibel. Um die Sicherheit der Nutzer zu gewährleisten, wurde das maximale Drehmoment, welches auf die Finger wirkt, auf 5kg/cm begrenzt. Im Durchschnitt kann ein Finger ein Drehmoment von 7kg/cm erzeugen, wodurch ein Verletzungsrisiko ausgeschlossen werden sollen.

EXOS Wrist DK2 und EXOS Gripper DK1

Die Modelle der Firma *EXIII Inc.* setzen ebenfalls auf Force Feedback. Anders als bei den bisher genannten Modulen handelt es sich bei dem EXOS Wrist [83] um eine mit zwei Motoren versehene Manschette und nicht direkt um einen Handschuh. Die Manschette wird um das Handgelenk getragen und soll beispielsweise den Rückstoß einer Schusswaffe simulieren können, indem das Handgelenk durch die Motoren zurückgezogen wird. Mit einem Gewicht von 1,3kg und einer Akkulaufzeit von ca. 2,5 Stunden kann sie kabellos in der virtuellen Realität verwendet werden. Hierbei ist eine Anbindung der eigenen SDK in *Unity* möglich und funktioniert gemeinsam mit der *HTC VIVE*, der *Meta Quest*, dem *Windows Mixed Reality Headset* und *SteamVR*. Mittlerweile ist bereits das EXOS Wrist DK2 auf dem Markt, da das EXOS Wrist DK1 nur in geringer Stückzahl produziert werden konnte. Insbesondere die Reduktion des Gewichts (von ca. 1kg auf 350g), die bessere Tragbarkeit und zusätzliche haptische Reproduktion durch verbesserte Hardware sind hierbei nennenswert. Zusätzlich zu der Manschette wurden die EXOS Gripper [206] entwickelt. Diese krabbenscherenartigen Handschuhe dienen als Controllerersatz, mit denen durch Zusammendrücken virtuelle Gegenstände greifbar gemacht werden sollen. Hierbei wird ebenfalls haptisches Feedback durch eine Gegenkraft zwischen Daumen und Zeigefinger erzeugt, die für ein natürliches Gefühl beim Greifen sorgen sollen.

HaptX Gloves DK2 & HaptX Gloves G1

Kabelgebunden, dafür aber mit viel Funktionalität ausgestattet sind die HAPTX GLOVES DK2 [125, 205]. Diese von *HaptX Inc.* entwickelten Haptik-Handschuhe bieten das bisher stärkste Force Feedback in der Liste, mit einer Zuglast bis zu 40 Pfund (ca. 18 kg). Das Unternehmen selbst bezeichnet sie als die „stärksten“ haptischen Handschuhe auf dem Markt. Möglich gemacht wird dies durch ein in die Handschuhe verbautes Exoskelett. Mit Mikrofluidiktechnologie und Luftpolster, die in den Stoff der Handschuhe eingelassen sind, sollen zudem weitere Empfindungen imitiert werden können. Ziel der Technologie ist es, die Haut so zu verdrängen, wie es ein echtes Objekt tun würde. Ergänzend befinden sich 133 taktile Punkte innerhalb jedes Handschuhs, die in Einheit mit den anderen haptischen Komponenten zu einem „*Grad an Realismus, den andere haptische Geräte nicht erreichen können*“ [125] führen sollen. Darüber hinaus ist auch Bewegungs-Tracking durch ein magnetbasierte Motiontracking möglich, welches durch das firmeneigene Motion-Capturing-System eine „Sub-Milimeter-Präzision ohne spürbare Latenz“ [125] erlaubt. Um all dies zu ermöglichen und dennoch mobil zu bleiben, sind die Handschuhe an einer eigenen Rechereinheit verbunden, welche wie ein Rucksack am Rücken getragen werden kann. Dieses Gerät ist jedoch ausschließlich für die Industrie gedacht.

Aus diesem Anlass wurden die *HaptX Gloves G1* [20, 125] entwickelt, welche preislich erschwinglicher gestaltet wurden, um sie einer breiteren Masse zugänglich zu machen. Zu der benötigten Technik gibt es ein Abomodell, worüber die Recheneinheit, das sogenannte Airpack auf Kaution gemietet werden kann. Die Handschuhe bieten ähnliche Funktionen wie die *HaptX Gloves DK2*, darunter die haptische Wahrnehmung durch Mikrofluidik und Force Feedback. Zur Zeit dieser Arbeit sind sie jedoch noch nicht auf dem Markt und sollen im dritten Quartal 2023 ausgeliefert werden (Stand: 08.2023).

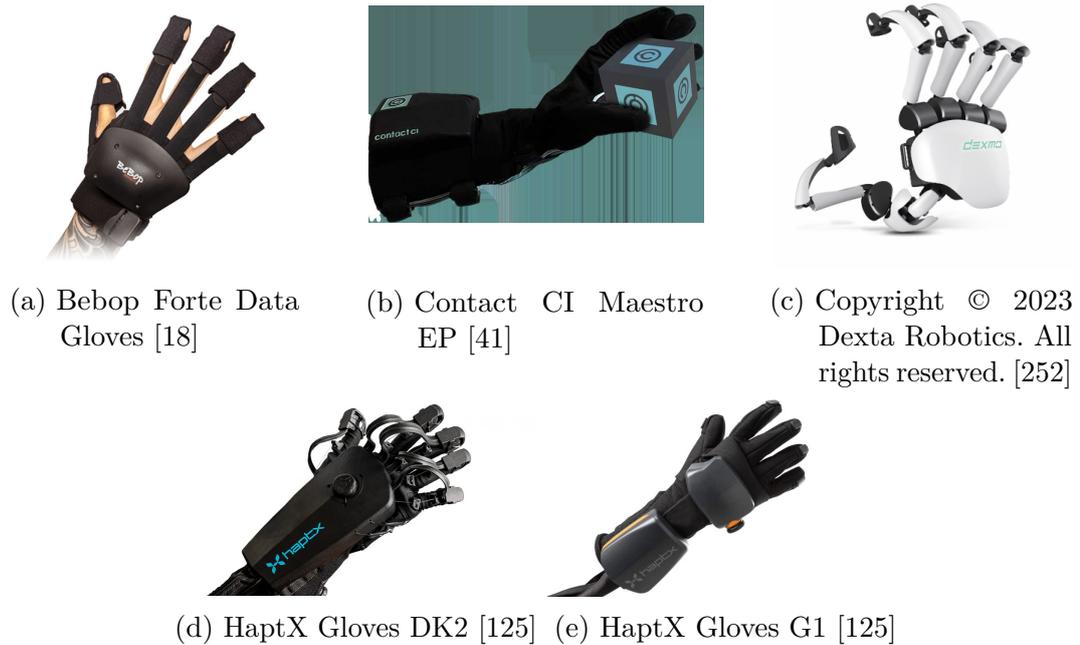


Abbildung 14: Darstellung der betrachteten Datenhandschuhe

LucidGloves

Da die bisher genannten Modelle sehr kostspielig sind, haben sich auch Privatpersonen an der Erstellung eines haptischen Handschuhs versucht. Einer der im Netz bekanntesten Prototypen ist der *LucidGlove* [180]. Die Anleitung von *Lucas LucidVR* befähigt technikinteressierte Personen zu dem Bau eines haptischen Handschuhs mit einem Herstellungspreis von ca. \$30 bis \$60 pro Handschuh. Derzeit gibt es bereits vier unterschiedliche Prototypen mit Anleitungen im Netz, welche stetig weiter entwickelt werden (Stand: 08.2023). Konzentriert wird sich hierbei in erster Linie auf die Haptik mit Force Feedback, welches durch einen 9g Servomotoren pro Finger gesteuert wird. Damit unterscheidet sich diese Technik von den bisher besprochenen Modellen, die einen deutlich komplexeren Aufbau für die Widerstandssimulation genutzt haben. Bei den *Lucid Gloves* werden einfache Fäden genutzt, die an den Fingerkuppen befestigt werden und die Finger durch die Motoren präzise zurückhalten. Neben einer Liste mit allen benötigten Utensilien wird ebenfalls der Zusammenbau Schritt für Schritt erklärt. Hierbei ist zu beachten, dass die Handschuhe derzeit nur mit dem Trackingsystem der *HTC VIVE* via *Lighthouses* funktionieren. Im Rahmen einer Abschlussarbeit [35] wurde der *LucidGlove Prototype 4* bereits innerhalb der Universität Siegen von Medizinern evaluiert und als sinnvolle Alternative zu den derzeitigen Controllern befunden.

MANUS Prime X Haptic VR

Der zu Beginn für den Privatgebrauch konzipierte haptische Handschuh Manus Prime X Haptic VR [197] (siehe Abbildung 15a) der Firma *MANUS Meta* richtet sich heutzutage ebenfalls eher an die Industrie. So stieg der Preis des Prototyps von 300 Euro auf die nun knapp 5.000 Euro (Stand 03.2022). Um Sinnesreize zu übermitteln, sind auf dem Handrücken sowie auf der Höhe des Mittelknochens der Finger taktile Sensoren angebracht, die über das am Handrücken installierte Haptik-Modul angesteuert werden können. Durch die dadurch entstehenden Vibrationen können so gewisse Widerstände und Objekte innerhalb der virtuellen Welt dargestellt werden. Der Fokus dieser Handschuhe liegt jedoch insbesondere auf dem Hand- und Fingertracking, welches die haptischen Erfahrungen präzisiert. Die Entwickler versprechen eine schnelle Kalibrierung und bieten neben der Möglichkeit, unterschiedliche Tracker und Controller an die Handschuhe zu knüpfen, auch eigene Tracker an. Diese sind im Vergleich zu den regulären *HTC VIVE* Trackern mit mehr Sensoren für ein präzises Tracking ausgestattet und wiegen darüber hinaus mit 62g ganze 27g weniger als das Modell von *HTC*. *MANUS* bietet eine Schnittstelle für unterschiedliche Entwicklungsumgebungen, so für *Unreal* und *Unity*. Mittlerweile gibt es ein neues Modell, den Manus Prime 3 Haptic XR Handschuh [199], der von *QuantumAI* unterstützt wird und einige Verbesserungen zum ursprünglichen Modell bieten soll (Stand: 08.2023).

Noitom Hi5

Auch das Unternehmen *Noitom* hat sich an der Entwicklung von Datenhandschuhen versucht. Der Noitom Hi5 VR Glove [221] ist für die Hand- und Fingererkennung in der Virtual Reality ausgelegt. Dazu werden die Fingerpositionen durch Sensoren in die virtuelle Umgebung übertragen. Ziel ist eine schnelle und genaue Übertragung, um gut in der virtuellen Welt interagieren zu können. Dazu werden *Unreal* und *Unity* von der zugehörigen SDK unterstützt. Für das Tracking im Raum werden jedoch zusätzlich externe Tracker benötigt. Ausgelegt ist das System für das *HTC VIVE* Trackersystem. Die Haptik wird ausschließlich als Vibrationen über das Handgelenk übertragen und kann durch die SDK weiter spezifiziert werden. Innerhalb einer Abschlussarbeit der Universität Siegen wurden die Noitom Hi5 bereits mit einem eher ernüchternden Ergebnis evaluiert [373]. Demnach sind die Performance und das Tracking nicht so verlässlich wie erhofft. Mittlerweile wird das Nachfolgepaar, die Hi5 2.0 VR Gloves (siehe Abbildung 15b) ohne Haptik auf dem Markt vertrieben (Stand: 08.23). Der Fokus dieser Handschuhe liegt spezifisch auf einem präzisen Tracking in der virtuellen Welt.

Plexus VR Glove

Im Gegensatz zu den meisten bisher besprochenen Haptik-Handschuhen richtet sich der Plexus VR Glove [52] an den Privatkunden. Mit einem Preis von \$249 pro Paar ist er einer der preisgünstigsten haptischen Handschuhe, der derzeit reserviert werden kann (Stand: 08.2023). Für die Haptik sorgen fünf taktile Aktoren, jeweils einer pro Finger. Sie sind in das formbare Plastik, aus welchem die Handschuhe bestehen, eingelassen. Für weitere Modelle könnte ein Force Feedback geplant sein [194]. Das Tracking funktioniert wie bei anderen haptischen Handschuhen mit externen Trackern. Dazu können, wie bei den *Noitom Hi5*, die Tracker der *HTC VIVE* genutzt werden. Ebenso ist es möglich, auch die unterschiedlichen Controller von der *HTC VIVE* oder der *Meta Quest* an die Handschuhe anzubringen und diese wie Tracker zu nutzen. So ist die Position innerhalb kompatibler Systeme wie beispielsweise *Unreal* oder *Unity* mit der SDK auslesbar. Darüber hinaus kann auch in *Python*, *C#* und *C++* für den Handschuh entwickelt werden. Mit einer Batterielaufzeit von 2 bis 3 Stunden erreichen sie eine ähnlich hohe kabellose Laufzeit wie andere bisher vorgestellte Handschuhe. Jedoch ist derzeit nicht klar, wann die Handschuhe auf dem Markt erscheinen.

SenseGlove Nova

Force Feedback, vibrotaktiler Feedback und Motion Tracking, diese Elemente vereint der haptische Datenhandschuh SenseGlove Nova [279] des niederländischen Unternehmens *SenseGlove*. Für das Force Feedback wird innerhalb von 10ms durch Fäden ein Widerstand von bis zu 20 Newton (ca. 2 kg) erzeugt, um die Beschaffenheit von Objekten der virtuellen Welt zu imitieren. Darüber hinaus sind Schwingspulen-Aktuatoren integriert, welche Empfindungen wie das Klicken einer Maus simulieren können sollen. Kombiniert wird diese Technologie so wie bei den bisher vorgestellten Datenhandschuhen mit Hand- und Fingertracking, um das haptische Feedback präzise an die Gegenstände in der VR bzw. AR anzupassen. Auch hier werden externe Trackingsysteme benötigt. Der SenseGlove Nova ist nicht der erste haptische Handschuh von *SenseGlove*. Zuvor erschien auch ein Exoskelett, das *Development Kit* [278]. Dieses war jedoch noch kabelgebunden und konzentrierte sich nur auf die Möglichkeiten des Force Feedbacks.

TactGlove DK1

Auch der TactGlove DK1 [27, 362] der Firma *bHaptics* richtet sich an den privaten Endverbraucher. Das Unternehmen konnte durch bereits entwickelte haptische Hardware Erfahrungen in diesem Bereich sammeln und hat passend zu dem bestehenden Portfolio haptische Handschuhe entwickelt, welche mit einem Preis von \$299 für Privatpersonen erschwinglich sind. Der Handschuh besitzt pro Fingerspitze einen kleinen Aktor für das haptische Feedback. Die Firma gibt an, dass ihr System mit allen handelsüblichen VR-Systemen, die kamerabasiert arbeiten, kompatibel ist. Für andere Systeme soll auch eine Infrarotkamera wie die Leap Motion [346] verwendet werden können. Das komplett kabellose Modul kann bis zu dreieinhalb Stunden genutzt werden und ist in vier verschiedenen Größen erhältlich. Die Verwendung wird hier eher im Gamingbereich gesehen, wobei bereits kompatible Programme vorgestellt wurden.

VRgluv

Der VRgluv [359] richtete sich ebenfalls an den Privatanutzer und sollte mit einem Preis von \$299 sowie der TactGlove DK1, auf den Markt gebracht werden. Im Gegensatz zu diesen besitzt der haptische Handschuh der gleichnamigen Firma *VRgluv* ein Exoskelett, um Force Feedback zu ermöglichen. Dabei sollen sie mit einer Zugkraft von bis zu 10 Pfund (ca. 4,5kg) auf die Finger des Nutzers wirken können, um harte und weiche Objekte der virtuellen Realität berührbar zu machen. Gefördert wurde diese haptische Ergänzung über die Plattform *Kickstarter*, jedoch ist die Webseite zum aktuellen Zeitpunkt nicht mehr zu erreichen, weshalb davon auszugehen ist, dass die Entwicklung dieser Handschuhe womöglich eingestellt wurde (Stand: 08.2023).



(a) MANUS [197, 350]



(b) Noitom [177]



(c) SenseGloves [279, 351]



(d) bHaptics [27, 349]

Abbildung 15: Darstellung der betrachteten Datenhandschuhe (2)

Prototypen

Neben den bisher genannten haptischen Handschuhmodellen, welche entweder für den Markt bestimmt sind oder in Form von Forschungsarbeiten entstanden, gibt es noch einige Modelle, die nur in Form von Prototypen oder sogar nur als Patent existieren. Diese sind nicht direkt für den Nutzen auf dem Markt bestimmt, sondern dienen als Wegweiser für haptische Neuerungen. Zwei dieser „Ideen“ werden nun im Folgenden noch einmal genauer beleuchtet, um einen möglichen Ausblick in die Zukunft zu gewähren.

Meta haptischer Handschuh

Das Unternehmen *Meta* hat im Jahr 2021 einen ersten Prototyp ihres haptischen Handschuhs präsentiert [142, 250]. Über den Datenhandschuh sollen Hand- und Fingerbewegungen präzise erfasst und ein taktiles Feedback erzeugt werden. Mittels Druckluft, welche durch mechanische Aktuatoren gesteuert wird, sollen Beschaffenheit, Größe und das Gewicht von virtuellen Objekten an den Nutzer vermittelt werden. Dazu besitzt der Handschuh kleine Kammern, in welche Luft eingelassen werden kann. So ist indirekt auch ein Force Feedback möglich. *Meta* zieht in Betracht, diese Hardware mit einer KI zu verknüpfen, um die Objekte optimal darstellen zu können. Jedoch wird derzeit nur unternehmensintern daran geforscht.

Oculus VR Patent

Neben Prototypen und fertiger Hardware existiert auch ein Patent für einen haptischen Handschuh. Die Firma *Oculus VR* startete 2016 eine Beschreibung für eine Technologie, welche es ermöglicht, „die Verformung der Finger an reale Objekte in die virtuelle Welt zu übertragen“ [116, 206]. Dieses Patent wird unter dem Namen *Skin stretch instrument* geführt und ist bis zum Jahr 2036 aktiv, sofern es nicht verlängert wird.

4.4.2 Haptische Anzüge und Westen

Neben den zuvor aufgelisteten haptischen Handschuhen gibt es auch ganze Westen und Anzüge. Diese eröffnen die Möglichkeit, Sinnesreize über Teile oder gleich den gesamten Körper auszusenden. Dadurch sind beispielsweise das Simulieren von Berührungen, aber auch stärkeren Reizen wie dem Rückstoß einer Waffe in die Schulter möglich, was wiederum neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Die folgende Tabelle gibt einen detaillierten Überblick über die aktuelle Hardware in diesem Bereich. Anders als bei den Handschuhen gibt es hierbei kein Force Feedback, dafür jedoch andere Spezifikationen, so wie beispielsweise die Nutzung von elektrischen Impulsen zur Imitation von haptischen Eindrücken in der virtuellen Realität. Dadurch ist die Preisspanne ebenso vielfältig wie bei den haptischen Handschuhen.

Name	Haptical Feedback Type	Haptic Specification	Bodyparts	SDK	Top Sizes	Bottom Sizes	Battery Life	Connection	Tracking	Weight	Price
ElecSuit	Electrical Haptic	8 electrodes	Upper + Lower	App Control	5 sizes	5 sizes per gender	N/A	Bluetooth	N/A	N/A	\$220
Exoskin	Vibration Haptic	32 sensory motors	Upper	Open Source VR	12 sizes	N/A	N/A	Cable	N/A	N/A	\$399
Feelbelt	Akustic Haptic	10 pulse generators (10- 20k Hz)	Hips	N/A	2 sizes	N/A	6hrs	Bluetooth 5.0 /AUX	N/A	280g	~\$380
HoloSuit	Vibration Motors	9 haptic motors	Upper	Unity, Unreal	One Size	One Size	8hrs	Bluetooth, Wi-Fi	36 motion sensors	N/A	~\$9,949
KOR-FX GAMING VEST	Akustic Haptic	2 akustic motors	Upper	Library of Games	One Size	N/A	40hrs	Bluetooth	N/A	N/A	\$99
OWO Haptic Vest	Electrical Haptic	10 haptic electrodes <100 ohm	Upper	Android, Unity, Unreal	9 sizes	N/A	8hrs	Bluetooth 5.2	N/A	600g	\$450
Shockwave	Vibration Motors	72 haptic points 10mm x 3mm	Upper + Lower	Unity, C#, Library of Games	7 sizes	N/A	9hrs	Bluetooth 5.0	12 tracker full-body tracking	N/A	\$279
Skinetic Actronika	Vibration Motors	20 HapCoil Voice-Coil Motors	Upper	Unity , Unreal, C++	One Size	N/A	8hrs	Bluetooth	N/A	2.5kg	\$859
Subpac X1	Electrical Haptic	Tactile Frequenz 1-250Hz	Upper	Android, IOS	One Size	N/A	8hrs	Bluetooth	N/A	N/A	\$1,085
TactSuit X40	Vibration Motors	40 ERM motors	Upper + Addons	Unity, Unreal IOS, Android	One Size	N/A	18hrs	Bluetooth 4.0/AUX	N/A	1,7 kg	\$499
TESLASUIT	Electrical Haptic	90 Kanäle, ~150 Hz, ~60mA	Upper + Lower	Unity, Unreal	12 sizes	12 sizes	5hrs	Bluetooth, Wi-Fi 2,4 GHz	6-axis or 9-axis IMU	1,7kg	\$12,999
Woojer Vest 3	Akustic Haptic	6 Osci TRX2 transducer	Upper	N/A	One Size	N/A	8hrs	Bluetooth 5.0, USB-C	N/A	1,5kg	\$499

ElecSuit

Am 30. November 2021 hat das südkoreanische Sporttechnologieunternehmen *WaveWear* bekannt gegeben, dass sie an einem haptischen Anzug, dem ElecSuit [299, 364] arbeiten (siehe Abbildung 16a). Dieser verwendet das firmeneigene *ElecSil*, eine leitfähige Silikon-technologie, die Strom über den Körper in die Muskeln aussenden soll. Ziel ist es, den ElecSuit kompatibel mit unterschiedlichen VR- und Sportanwendungen nutzen zu können. Darunter eine Unterstützung für Gaming, aber auch die Möglichkeit des EMS-Trainings mit dem Komfort von Sportkleidung. Ergänzend sollen Massagefunktionen vor und nach dem Training genutzt werden können. Das Unternehmen plant, den Anzug in eine Smartwear-Plattform bis zum Jahre 2025 zu integrieren. Derzeit wird der Anzug auf ihrer Seite beworben [365], ist jedoch nicht dort zu erwerben. Ob und wann der Anzug erworben werden kann, kann zu diesem Zeitpunkt nicht gesagt werden (Stand: 08.2023).

Exoskin

Vorbestellungen waren zwar möglich, derzeit ist jedoch kaum etwas über den haptischen Anzug Exoskin in Erfahrung zu bringen. Das Unternehmen *NeoSensory* hatte zwar Anzüge zum Vorbestellen auf ihrer Seite gelistet, diese ist jedoch derzeit nicht zu erreichen [215]. Seiten wie *VRScout* [363] berichten darüber, dass der Anzug mit 32 sensorischen Motoren ausgestattet ist, welche eine Vielzahl von haptischen Eindrücken auf den oberen Körper abbilden können sollen. Diese könne auf dem Promobild in Abbildung 16b schemenhaft erkannt werden. Ziel sei es, durch VR die Distanz zwischen den Menschen zu überwinden. Angeboten wurde er für \$399 und war in 12 verschiedenen Größen erhältlich.

Feelbelt

Der Feelbelt der Firma *Feelbelt* [87] wurde mit Unterstützung des Audio-Streaming-Dienstes *Spotify* [297] entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen Gürtel, welcher vorzugsweise dazu genutzt werden soll, Musik spürbar zu machen (siehe Abbildung 16c). Eine patentierte Software des Entwicklers wandelt Audiosignale in haptisches Feedback um. Anschließend wird dieses haptische Rückmeldung dann über zehn Impulsgeber synchron und in stereo auf den Körper übertragen, um dabei einzelne Töne fühlbar und haptisch unterscheidbar zu machen. Die Nutzung erstreckt sich über den Gamingbereich, den Musikbereich, Filmbereich bis hin zur Verbesserung des VR-Erlebnisses. Mit einem Preis von 279€ Euro liegt er im Niedrigpreissegment bezogen auf vergleichbare Hardware und kann kabellos bis zu 6 Stunden genutzt werden.

HoloSuit

Ein mechanischer Anzug, welcher Ganzkörper-Tracking und haptisches Feedback vereinen sollte, ist der *HoloSuit* [134, 160, 374] welcher über Kickstarter mitfinanziert wurde. Hierbei handelt es sich um einen Anzug mit 36 eingebetteten Sensoren, verknüpft mit neun haptischen Feedback-Geräten, welche über den ganzen Körper Bewegungsdaten aufzeichnen können und durch die vibrotaktile Haptik Informationen an den Nutzer zurücksenden sollten. Kompatibilität mit VR und AR sollte ebenfalls gewährleistet sein. Jedoch lässt sich mittlerweile die Firmenwebsite nicht mehr erreichen, wodurch der aktuelle Stand dieses Gerätes unklar ist (Stand: 08.2023).

KOR-FX IMMERSIVE GAMING VEST

Auch die *KOR-FX IMMERSIVE GAMING VEST* wurde über Kickstarter unterstützt [140, 161]. Mit einem Preis von nur \$99 ist sie eines der günstigsten Hardwaremodule, um Haptik zu nutzen, wird jedoch derzeit nur in Amerika vertrieben. Trotz des Namens „Weste“ sind nur die Brust und die Schultern bedeckt. Die Weste verwendet eine akustisch-haptische Technologie, welche Audio in präzise gerichtete haptische Ausgaben umwandelt. Dazu besitzt sie zwei Akustik-Aktoren, die für den haptischen Eindruck sorgen. Derzeit wird an einer SDK-Anbindung gearbeitet.

OWO Haptic Vest

Auch das Start-up Unternehmen *OWO* [80, 230] versucht sich an haptischer Kleidung. Dreißig unterschiedliche Empfindungen sollen mit dem Haptik-Shirt aus Lycra auf zehn unterschiedliche Körperregionen übertragen werden. In Kombination mit einem Algorithmus sollen dadurch viele verschiedene Empfindungen erzeugt werden können. Hierbei wird jedoch nicht nur mit positiven Reizen geworben wie einer sanften Umarmung, sondern mit Empfindungen wie Insektenbissen, Messerstichen und Austrittswunden. Diese können zur Echtzeit auch per eigener App gesteuert und in der Intensität angepasst werden. Die Elektroden besitzen für all diese Effekte eine hohe Leitfähigkeit von < 100 Ohm. Die in sechs verschiedenen Größen erhältliche Jacke kann insgesamt um die 8 Stunden genutzt werden, bevor sie aufgeladen werden muss. Derzeit werden bereits 11 verschiedene Spiele von der *OWO*-Jacke unterstützt, darunter sieben Native und die restlichen vier Spiele Semi-Native. Die dazugehörige SDK für die Entwicklungsumgebungen *Unity* und *Unreal*, sowie den Programmiersprachen *C#* und *C++* ermöglichen es darüber hinaus, selber Anwendungen für die Hardware zu entwickeln.



Abbildung 16: Darstellung der betrachteten haptischer Westen

Shockwave

Wie zuvor angesprochen, werden einige der neuen Technologien über Kickstarter unterstützt und gefördert. Darunter auch der Shockwave Haptic Suit der Firma *SHOCKWAVE* [162, 284]. Über 64 Haptikpunkte sollen Empfindungen wie Pistolenschüsse oder Schwertstriche fühlbar machen. Das eigens konzipierte „*HD HAPTICS*“-System ermöglicht die sogenannte *ghost effect vibration*, sodass auch an den Stellen, an welchen keine Aktoren liegen, Vibrationen gespürt werden können. Diese sollen durch spezielle Vibrationsfrequenzen und Richtungen, gepaart mit einem selbst geschriebenen Algorithmus funktionieren. Zusätzlich soll Full-Body-Tracking unterstützt werden. Hierzu werden 8 Sensorpunkte verwendet, welche die realen Bewegungen in die Virtual Reality übertragen. Es wurden bereits unterstützte Spiele angegeben, die mit dem Anzug kompatibel sein sollen. Derzeit kann der Anzug vorbestellt werden und soll im vierten Quartal 2023 ausgeliefert werden (Stand: 08.2023).

Skinetic Actronika

Die Skinetic-Weste [1, 11] hat im Jahr 2023 den *Innovation Award* der *Consumer Electronics Show (CES)* gewonnen und soll im August 2023 das erste Mal an Kunden ausgeliefert werden (Stand: 08.2023). Die haptische Weste soll durch die 20 von der zugehörigen Firma *Actronika* patentierte vibrotaktile *Voice-Coile*-Motoren eine Vielfalt an unterschiedlichen Vibrationen ermöglichen. Diese sollen 100 % der menschlichen vibrotaktile Wahrnehmung abdecken. *Actronika* gibt darüber hinaus an, dass die Wahrnehmung und die Empfindungen intern untersucht wurden und sich für die Benutzer „echt“ anfühlen. Ebenfalls wurde eine Kompatibilität mit verschiedensten VR-Systemen bestätigt.

SUBPAC X1

Um Geräusche haptisch zugänglich zu machen, wurde die Audioplattform SUBPAC [318] entwickelt. Die namensgleiche Firma *SUBPAC* versucht hierbei durch die von ihnen genannten «drei Schichten der Immersion» (Haptik, Interzeption, Berücksichtigung von Knochenschalleitungen) tiefer eindringende und nuancierte Bässe mit weitaus mehr Auflösung und Reichweite als herkömmliche Lautsprecher und Kopfhörer zu liefern. Das SUBPAC X1 ist ein tragbares System, welches wie ein Rucksack auf dem Rücken getragen werden kann. Mit einer Akkulaufzeit von bis zu sieben Stunden macht es die Bässe mit bis zu 200Hz haptisch spürbar. Mittlerweile gibt es eine Vielfalt an Modellen, welche über die Website erworben werden können.

TactSuit und haptische Addons

Unter dem Namen TactSuit [23] der Firma *bHaptics* werden mehrere Produkte zusammengefasst. Zum einen der namensgebende TactSuit selbst. Von der haptischen Weste hat das Unternehmen zwei unterschiedliche Modelle auf den Markt gebracht, die für das Gaming optimiert wurden. Einmal den TactSuit X16 und den TactSuit X40 (siehe Abbildung 17d), die namengebend die Zahl der Haptikpunkte im Namen tragen. Das Vorgängermodell, der Tactot DK3 besaß so wie der TactSuit X40 ebenfalls 40 Haptikpunkte, jedoch kein Audioport und erreichte eine geringere Akkulaufzeit. Vorteile aller Westen sind neben dem Preis die universelle Größe, welche die meisten Größen und Körperformen unterstützt. Um die Immersion weiter zu verstärken, sind neben den genannten Westen auch weitere haptische Elemente verfügbar, welche zusätzlich erworben werden können. Zum einen den *TactVisor* [28]. Dies ist eine haptische Gesichtsmaske für das VR-HMD. Sie besitzt insgesamt vier Haptikpunkte und kann Gefühle wie Schüsse oder Schläge ins Gesicht durch Vibration simulieren. Darüber hinaus stellt *bHaptics* die sogenannten *Tactosys* bereit. Die sind haptische Elemente, welche für die Arme [24], die Hände [25] und die Füße [26] jeweils unterschiedliche Haptikelemente bieten. Passend zur Körperposition werden unterschiedlich viele Haptikpunkte bereitgestellt. Für die Arme sechs und für die Hände und Füße jeweils drei pro Gliedmaße.

Um den Effekt des TactSuit zu verstärken, hat ein Youtuber mit dem Namen *TheProGamerJay* [334] Sandpapier und Stacheln in die Weste verbaut. Diese konnten den Effekt des Suits zwar verstärken, jedoch nur für negative Empfindungen.

TESLASUIT

Einer der ersten Ganzkörperanzüge, der auf dem Markt erschienen ist, ist der TESLASUIT [332]. Er wurde von der Firma *TESLASUIT* entwickelt und ging im Jahre 2020 in den Verkauf. 2019 bekam er den *Red Dot Award* im Bereich *best of the best* [71]. Der Anzug besteht, anders als viele der anderen vorgestellten haptischen Anzüge aus zwei Teilen: Einer Jacke und einer Hose, welche über ein USB-C Kabel mit einer Powerbank mit Strom versorgt werden können. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Jacke unabhängig von der Hose zu nutzen. Für das taktile Feedback werden insgesamt 80 Elektrostimulationskanäle genutzt, die mit bis zu 300Hz pro Kanal betrieben werden können. Die Impulsbreite pro Kanal liegt bei bis zu 260ms. Ebenfalls sollten die ersten Modelle Temperaturanstiege und -abfälle zwischen 20°C und 40°C für den Nutzer erfahrbar machen können [51]. Die Unterstützung der Peltierelemente wurde in späteren Modellen jedoch entfernt. Neben der Haptik bietet der TESLASUIT die Möglichkeit zur Aufzeichnung von biome-trischen Daten und zum Körper-Tracking; letztgenanntes verwendet zehn Bewegungs-sensoren, welche die Position im Raum sowie ihre Ausrichtung auslesen und ausgeben können. Ausgeliefert wird der TESLASUIT mit eigener SDK und Programmen, welche zur Kalibrierung haptischer Eindrücke und zum Motion-Tracking genutzt werden können.

Woojer Vest Edge und Strap Edge

Auch die Firma *Woojer INC.* [384] beschäftigt sich mit der Idee, Audio und Haptik zu verbinden. Dazu wurden gleich zwei unterschiedliche Produkte auf den Markt gebracht: Die Vest Edge [382] ist hierbei eine 499 € teure Weste, welche für den Hausgebrauch im Rahmen des Gamings sowie für VR, Filme und professionelle Audio-Anwendungen verwendet werden kann. Hierzu besitzt sie sechs patentierte Osci-Schallwandler, die Frequenzen bis zu 200Hz erreichen können. Für das beste Ergebnis sind jeweils zwei Wandler vorne, hinten und an der Seite der Weste eingearbeitet. Mittlerweile gibt es die Woojer Vest 3 [383], die etwas teurer ist, und mit den neuen Osci-TRX-Schallwandlern für eine 360° Immersion sorgen soll.

Zusätzlich vertreibt *Woojer* einen Haptikgürtel - den Strap Edge [380]. Dieser ist für unterwegs ausgelegt und konzentriert sich auf die Darstellung von Bässen und Klan-gintensitäten durch haptische Elemente. Hierbei kann der Gürtel um Hüfte oder Brust getragen werden. Mit einem Preis in Höhe von 179 € ist er günstiger als die Weste, wurde jedoch mittlerweile durch den Woojer Strap 3 [381] abgelöst.



(a) SHOCKWAVE [162]



(b) Skinetic [1]



(c) Subpac X1 [318]



(d) TactSuit X40 [348]



(e) TESLASUIT



(f) Woojer Vest 3 [347]

Abbildung 17: Darstellung der betrachteten haptischer Westen (2)

Disney Force Jacket

Auch das weltweit bekannte Unternehmen *Disney* forscht an haptischen Anzügen wie bspw. dem Disney Force Jacket [88]. Im Rahmen seiner Forschung legt Disney den Fokus insbesondere auf Druckrezeptoren für den Oberkörper. Pneumatisch betätigte Airbags und Kraftsensoren sollen gemeinsam mit hochfrequenten Vibrationen präzise auf den Körper einwirken. Darstellungen wie Schläge oder Umarmungen sollen so auf dem Körper dargestellt und gefühlt werden können. Ziel ist die Synchronisation von haptischen Eindrücken mit der Wahrnehmung des Hörens und Sehens. Derzeit handelt es sich allerdings nur um einen Prototypen, an welchem weiter geforscht wird. Unter dem Strich ist zudem davon auszugehen, dass der Anzug nicht auf dem freien Markt verfügbar, sondern ausschließlich für die Verwendung im unternehmenseigenen Freizeitpark bestimmt sein wird.

4.4.3 Weitere haptische VR-Technologien

Neben den bisher vorgestellten haptischen Handschuhen und Anzügen gibt es weitere technologische Neuheiten, welche die Immersion durch haptische Eindrücke unterstützen können. In diesem Unterkapitel werden einige Optionen aufgelistet, um einen ersten Überblick über marktverfügbare haptische Elemente für Virtual Reality bzw. Augmented Reality zu geben. Die unterschiedlichen Kategorien dieser Hardware werden in der folgenden Tabelle aufgeschlüsselt. Darunter befinden sich haptische Stühle, Schuhe und weitere Eingabegeräte, welche eine haptische Interaktion mit der virtuellen Welt ermöglichen. Die gezeigten Modelle stellen eine Auswahl an Möglichkeiten dar und sollen nicht den Anspruch der Vollständigkeit erfüllen, insbesondere auch deshalb, weil der Markt verhältnismäßig unübersichtlich ist und die Definition von Haptik sehr unterschiedlich ausfällt.

Name	Type	Haptical Feedback Type	Functionality	Connection	Battery Life	Weight	Price
Roto VR Chair (buisness)	Chair	Vibration Motors	Motorised 360° + haptic Feedback	Bluethooth	~10 hrs	25kg	\$2,399
Roto VR Chair (home)	Chair	Vibration Motors	Motorised 360° + haptic Feedback	Bluethooth	N/A	N/A	\$699
VRGO Chair	Chair	Movement	Movement transferd to VR	Bluethooth	5 hrs	4 kg	~\$436
VRGO Mini	Chair	Vibration Motors	Movement transferd to VR	Bluethooth	N/A	N/A	~\$370
Yaw1	Chair	Movement	Virtual Reality-Motion-Simulator	LAN/WIFI/Bluethooth	N/A	25kg	\$1690
Yaw2 Pro	Chair	Movement	Virtual Reality-Motion-Simulator	LAN/WIFI/Bluethooth	-	~60kg	\$3080
MMOne VR Chair	Chair	Movement	Movement transferd from VR	N/A	-	1130kg	\$50,000
Whiplash Diabolo	Chair	Movement	Movement transferd from VR	Unknown	-	750kg	To rent
Ekto VR	Shoes	Movement	Movement transferd to VR for small places	Bluethooth	N/A	N/A	\$20,000
Cybershoes	Shoes	Movement	Movement transferd to VR for small places	WLAN, USB, DFMI	9 hrs	13kg	\$349.99
ICAROS Home	Fitness	Movement	Movement transferd to VR	-	-	49kg	\$3,253
Ultrahaptics STRATOS Explore	Pad	Mid-Air-Haptics Ultraschall	Present textures, surfaces and shapes	USB	-	0.7kg	\$2,500
Geomagic TOUCH	Input device	Force Feedback	Simulation and 3D Modelling	LAN	-	1.42kg	~\$3,154
Geomagic TOUCH X	Input device	Force Feedback	Simulation and 3D Modelling	LAN	-	2.86 kg	~\$14,796
ViR' Controller	Haptic contoller	Force Feedback	Authentic handweapon	Bluethooth	N/A	N/A	N/A
SaberGrip	Haptic contoller	Physical in-hand experience	Authentic fishing, sword fighting...	Bluethooth	N/A	N/A	~\$3,999
Haptic Links	Controller Addon	Variable Siffness actuation	Electro-mechanically physical connector	Cable	N/A	N/A	N/A

Roto VR Chair

Der Roto Chair [256] der Firma *Roto®VR* ist ein für die Virtual Reality optimierter haptischer Stuhl, den Abbildung 18a zeigt. Dieser ermöglicht eine automatische Rotation in Blickrichtung des Nutzers, wodurch ein immersives Gefühl geschaffen und Effekten wie Cyber Sickness entgegengewirkt werden soll. Dabei wird der Körper, ohne Aufwand des Nutzers, im Sitzen bewegt. Alle handelsüblichen VR-Geräte, außer *Playstation VR*, sollen von dem Roto Chair unterstützt werden. Darüber hinaus besitzt der Stuhl ein eingebautes sog. „Rumble Feedback“, welches mit dem Audioerlebnis gekoppelt ist. Die Intensität dieses Rüttelns ist manuell einstellbar und kann an das persönliche Empfinden angepasst werden. Eine weitere Spezifikation des Stuhls liegt in seiner Erweiterbarkeit. Er wurde so konzipiert, dass zusätzliche Add-ons wie beispielsweise Pedale, Lenkrad oder Schaltknöpfe angebracht und gemeinsam genutzt werden können, um die Interaktion noch realitätsnäher zu gestalten.

VRGO Chair

Der VRGO Chair [360] zählt ebenfalls zu den haptischen Stühlen und war für den Verbrauchermarkt vorgesehen, ist jedoch mittlerweile nicht mehr erhältlich (Stand: 08.2023). Anders als der Roto Chair überträgt dieser hockerähnliche Stuhl seine Drehungen und Neigungen in die virtuelle Realität. Der VRGO Mini [361] verfolgt dasselbe Konzept. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Stuhlaufgabe. Ein Vorteil soll die Verringerung von Effekten wie Cyber Sickness sein. Darüber hinaus besitzt der VRGO Mini durch unterschiedliche Vibrationen eine Haptik-Komponente.

Yaw1 und Yaw2

Eine weitere Möglichkeit zur Bewegungssimulation in VR stellte der Yaw1 dar [178]. Bei diesem Gerät handelt es sich um eine kompakte und leichte Sitzgelegenheit in Form einer Halbkugel, in welche sich der Nutzer hinein setzen kann (siehe Abbildung 18b). Durch seine Konstruktion soll der Yaw1 eine 360-Grad-Bewegungsfähigkeit auf der vertikalen Achse sowie einen Bewegungsbereich von +/- 35 Grad auf der horizontalen Achse gewährleisten. Mittlerweile wird mit dem Yaw2 bereits der Nachfolger [357] *Yaw VR Kft.* vertrieben. Dieser ist eine Weiterentwicklung des Yaw1 und ähnelt einem Stuhl. Er bietet zwar eine höhere Funktionalität, ist aber deutlich teurer und nicht mehr so kompakt wie sein Vorgänger. Dafür können die Bewegungen aus der VR mit diesem Gerät verlässlicher übertragen werden.

MMOne

Neben den bisher genannten Geräten für den Privatgebrauch sind auch solche marktverfügbar, welche sich explizit an den gewerblichen Anwender richten. So beispielsweise der MMOne [48, 237, 370] des ukrainischen Start-ups *MM Company*. Dieser Stuhl ist für spezielle VR-Anwendungen wie Flug- und Fahrsimulationen ausgelegt, wobei sich mit seiner Hydraulik eine Person bis zu einem Körpergewicht von maximal 120 kg in fast alle Richtungen drehen und schwenken lässt, ähnlich wie in einer Achterbahn. Des Weiteren zeichnen ihn mehrere ineinander greifende Stützen aus, welche Bewegungen in alle Freiheitsgrade zulassen.

Whiplash

Das spanische Unternehmen *Whiplash* [322] bietet ähnliche Systeme wie MMOne an. Seine sogenannten *Meta Chairs* richten sich vornehmlich an größere Unternehmen und können von diesen mittels Leihe angeschafft werden. Das Online-Angebot umfasst derzeit verschiedene Modelle wie bspw. den Diabolo. Dieser Stuhl ermöglicht Rotationen in vertikaler und horizontaler Richtung um 360°, fällt mit einem Gewicht von 750 kg allerdings alles andere als kompakt aus. Dennoch können durch derartig freie Bewegungsmöglichkeiten unter anderem virtuelle Achterbahnfahrten physisch eindrucksvoll erlebbar gemacht werden (siehe Abbildung 18c). Eine Kompatibilität mit verschiedenen HMDs ermöglicht zudem eine breite Nutzung, insbesondere für VR-Arcaden.

FunInVR

Das Unternehmen *FunInVR* [43] zeigt mit einer noch größeren Auswahl an Modulen, was darüber hinaus möglich ist, denn mit Hilfe von Vibrationen, Bewegung, Luft und Wasser wird die Immersion weiter gesteigert. Zudem bietet das Unternehmen passende Module auch für spezielle Anwendungen wie bspw. die VR Battleship 9D Game Machine [44] an. Dabei können zwei Nutzer gleichzeitig alle oben genannten Elemente erfahren, wenn sie in die Welt der dazugehörigen VR-Spiele eintauchen.

Auch wenn die Nutzung solcher Großgeräte im Alltag heute kaum vorstellbar ist, zeigt diese bislang kostspielige Technologie dennoch auf, wie haptische Erlebnisse sinnvoll genutzt werden können, um das VR-Erlebnis zu unterstützen und zu verbessern.

Ekto VR

Der Ekto VR [76, 286] ist ein Schuh, welcher für die gemeinsame Nutzung mit einem HMD designt wurden. Sein primäres Ziel liegt darin, den Herausforderungen der Fortbewegung innerhalb der virtuellen Realität entgegenzuwirken. Zu diesem Zweck kehrt er mit Hilfe seiner Motorisierung jene Bewegung um, welche beim Gehen erzeugt wird. Auf diese Weise sollen völlig natürliche Bewegungen ermöglicht und in die VR übertragen werden, ohne sich im physischen Raum von der Stelle bewegen zu müssen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass Einflüsse, die zu Cyber Sickness führen, reduziert werden.



(a) Roto VR Chair [256]



(b) Yaw1 Pro [387]



(c) WhipLash [322]



(d) Ekto VR [76]

Abbildung 18: Darstellung weiterer haptischer Geräte

Cybershoes

Eine weitere Möglichkeit, sich ohne reale Bewegung durch die virtuelle Realität zu bewegen, bieten die Cybershoes [54, 143]. Hierbei handelt es sich um Aufsätze, welche an den Füßen getragen deren Bewegung über den Boden mittels eines Sensors tracken. Rollen an der Fußsohle ermöglichen dabei die freie Bewegung der Füße, während die Bewegung in die virtuelle Realität übertragen wird. Dadurch ist auch aus der Sitzposition eine Bewegung durch den virtuellen Raum möglich.

ICAROS Home

Das ICAROS Home [137] der Firma *ICAROS* ist wiederum eher als Fitnessgerät zu betrachten. Es unterstützt zwar die Bewegung in der virtuellen Welt, besitzt jedoch keine haptischen Aktoren. Dennoch bietet dieses für den Heimgebrauch optimierte Gerät, in welches sich der Nutzer hineinlegt, eine funktionale Möglichkeit, die Ausrichtung des eigenen Körpers durch Gewichtsverlagerung zu verändern. Es dient somit dem Training von Koordination und Balance und ermöglicht durch freies Kippen die Übertragung der Bewegung in die virtuelle Realität, wodurch Erfahrungen immersiver werden, insbesondere innerhalb der spezifisch für das Gerät entwickelten VR-Anwendungen.

Ultrahaptics Stratos Explore Kit& Stratos Inspire

Das Stratos Explore [295, 344] von *UltraLeap* übermittelt haptische Eindrücke an die Hände, wird jedoch, anders als haptische Handschuhe, nicht am Körper getragen. Es handelt sich stattdessen um eine Platte, welche mittels Ultraschallwandler verschiedene Empfindungen darstellen kann, sobald die Hände darüber gehalten werden. Insbesondere im Rahmen von stationären VR-Anwendungen kann Stratos Explore nutzbar gemacht werden. Das für Forschungszwecke entwickelte Developer Kit wird von *UltraLeap* allerdings nicht mehr online vertrieben. Stattdessen wird die Technologie unter dem Namen Stratos Inspire [345] auf der Internetseite von *UltraLeap* präsentiert. Dabei scheint es sich um eine erweiterte Form des Stratos Explore zu handeln, welche ebenfalls von den sogenannten *Mid-Air-Haptics* profitiert und haptische Eindrücke stationär erlebbar macht.

Geomagic Touch

Der *Geomagic Touch* [226] der Firma *OR3D* ist ein haptisches Gerät, welches für präzise Positioneingaben genutzt werden kann und im Zuge dessen ein Force Feedback ausgibt. Mit Hilfe seiner Gelenke kann es zudem Widerstände darstellen. Das Gerät mit Stift und Greifarm zeigt Abbildung 19d. Zielgruppe sind Künstler und Designer, welche das Gerät bspw. für *3D Sculpting* nutzen können. Im Zuge dessen dient der Widerstand dazu, die genaue Beschaffenheit des Objektes wahrzunehmen. Der Geomagic Touch X, eine Erweiterung des Geomagic Touch, ermöglicht zusätzlich die Einstellung der Höhe. Das Gerät wurde bereits für Studien, die sich mit Haptik beschäftigen, genutzt (siehe Kapitel 4.1) und ist seit Jahren ein in der haptischen Forschung etabliertes Modul.

SaberGrip *Tactical Haptics* veröffentlichte im Jahre 2020 einen haptischen Controller namens SaberGrip [124]. Dieser sieht aus wie eine einfache Stange, kann jedoch durch erweiterbare Aufsätze für unterschiedliche Bereiche der virtuellen Realität nutzbar gemacht werden. Das Gerät profitiert so vom Effekt der passiven Haptik, d. h. der Nachbildung realer Gegenstände durch ähnliche Beschaffenheit und/oder ähnliches Gewicht. Ein Beispiel hierfür ist die Erweiterung durch ein Kurbelmodul, welches es, angelehnt an eine Angel, ermöglicht, durch kurbelnde Bewegungen in der VR zu interagieren. Eine weitere Besonderheit des Controllers liegt im sogenannten „*Shear Feedback*“, welches durch zwei mechanische Elemente am Griff des Controllers ausgelöst wird. Durch eine Auf- und Abwärtsbewegung sorgen diese Elemente für eine Reibung, welche in der Handinnenfläche verspürt werden kann.



Abbildung 19: Darstellung weiterer haptischer Geräte (2)

Prototypen

'ViR' Controller

Zum Zwecke eines realistischeren Spielgefühls im First-Person-Shooter-Bereich wurde von Tom Man im Jahre 2021 der konzeptionelle 'ViR' Controller [187, 293] entwickelt. Dieser ist nicht nur optisch an eine Pistole angelehnt, sondern ermöglicht es zudem, mittels Force Feedback den Rückstoß einer abgefeuerten Waffe wahrzunehmen. Darüber hinaus besitzt der Controller zusätzliche Aktuatoren für Vibration und unterstützt vollständiges Daumen- sowie Fingertracking. Das Design kann Abbildung 19e entnommen werden.

Haptic Links

Bei diesem Prototyp von *Microsoft* [82] handelt es sich um elastische Verbindungsstücke, welche genutzt werden, um einen Immersionsbruch im Rahmen des parallelen Einsatzes von zwei Controllern zu vermeiden: Denn sobald beide Controller denselben Gegenstand anfassen, sich jedoch weiterhin unabhängig voneinander bewegen können, kann es zu einem Bruch zwischen realer und virtueller Welt kommen. Diesem Effekt wird entgegengewirkt, indem die Controller über die *Haptic Links* verbunden werden. Sobald in der Virtual Reality mit beiden Controllern ein Gegenstand angefasst wird, verfestigt sich das ansonsten elastische Konstrukt und hält den Nutzer davon ab, die Controller unabhängig voneinander weiter zu bewegen. Auf diese Weise wird der Eindruck vermittelt, dass die Controller gemeinsam einen Gegenstand festhalten. Möglich ist es auch, die Controller abhängig von der Richtung weiter frei bewegen zu lassen. Hier kann das Beispiel einer Posaune angeführt werden, bei welchem der Ventilzug im vorderen Bereich des Instrumentes von einem Controller vor und zurückbewegt wird, während die andere Hand das Instrument selbst festhält. Dadurch ist es möglich, eine Vielzahl an Interaktionen darzustellen und eine gewisse Form des Force Feedback zu nutzen.

CamSoda und RealDoll

Die virtuelle Realität mit Haptik hat selbst in der Erotikszenen bereits Einzug erhalten. Die Unternehmen *CamSoda* und *RealDoll* arbeiten in Kooperation an einem Projekt, im Rahmen dessen virtueller Geschlechtsverkehr mit einer realen Person ermöglicht werden soll [36]. Hierzu sucht der Kunde über das Unternehmen *CamSoda* ein Camgirl als gewünschte Partnerin aus. Diese Partnerin wird wiederum beim Kunden Zuhause durch eine *RealDoll* verkörpert. Für den Geschlechtsverkehr wird eine Show per Video-Stream an eine VR-Brille übertragen. Damit der Koitus realistischer wirkt, werden die Bewegungen der Darstellerin dabei durch einen besonderen Dildo auf die Puppe übertragen, so dass der künstliche Unterleib der Puppe die Bewegungen der Darstellerin imitiert.

5 Abschluss der Forschungsgrundlagen

Auf Grundlage der betrachteten Forschungsarbeiten und dem aktuellen technischen Stand des State of the Art ergeben sich neue Erkenntnisse hinsichtlich haptischer Technologien. Darunter zeigen sich bereits einige Tendenzen hinsichtlich der gestellten Forschungsfragen. Gleichzeitig tun sich weitere Fragen auf, die beantwortet werden müssen, um die Grundlagen für eine sinnvolle Einbindung von haptischer Technologie in therapeutischen Anwendungen geben zu können. Dazu werden im Folgenden die Erkenntnisse der Forschung zusammengefasst, diskutiert und falls notwendig in neuen Forschungsfragen ausformuliert.

Der Forschungsstand zur Wirksamkeit von Virtual Reality-Therapie wirkt zwar basierend auf den Ergebnissen uneinig, jedoch zeigen die aktuellsten Forschungsarbeiten in unterschiedlichen Therapiebereichen sehr positive Ergebnisse. Eine Übertragbarkeit der in der VR-Therapie gelernten Mechanismen in die Realität kann durch die Ergebnisse angenommen werden, die auch in Langzeitbetrachtungen erhalten bleiben. Lediglich die schlechte Qualität der Forschung durch nicht randomisierte kleine Testgruppen wird häufig bemängelt [94], woran jedoch von verschiedensten Forschungsgruppen gearbeitet wird. Besonders die Möglichkeit einer ortsunabhängigen Therapie kann vielen Betroffenen zugutekommen [190]. Insgesamt lässt sich bereits eine Nützlichkeit aus der Ergänzung von Haptik in der VR-Therapie ableiten. Ore et al. [227] konnten an einem Beispiel feststellen, dass Haptik bei komplexeren Aufgaben zu präziseren und schnelleren Lösungen führen kann. Zusätzlich konnten Frieden et al. [97] aufzeigen, dass haptische Ergänzungen wie ein Ventilator bereits eine Steigerung der Immersion und in diesem Fall in einer Exposition zur Höhenangst, auch eine erhöhte Angst hervorrufen kann. Die Steigerung der Präsenz, die auch Gibbs et al. [109] und Gracia et al. [102] feststellen konnten, kann, wie in der Haupthypothese angenommen, dem Therapieerfolg zugutekommen.

Ebenfalls kann hieraus bereits eine Tendenz zu der in Kapitel 2 benannten Forschungsfrage „**2.2.2 Hat haptische Technologie einen Einfluss auf die Immersion innerhalb einer virtuellen Realität**“ abgeleitet werden, die dieser Annahme positiv entgegensteht. Jedoch gibt es für auf dem Markt befindliche haptische Technologie kaum Forschungsarbeiten. Dementsprechend muss die Forschungsfrage 2.2.2 für diese Technologie durch weitere Forschung beantwortet werden.

Bezogen auf die Forschungsfrage „**2.1.4 Für welche Zielgruppe eignen sich haptische Technologien und für welche nicht?**“ können ebenfalls bereits einige Annahmen getroffen werden. Das im State of the Art besprochene Paper von Mirzaei et al. [204] und die Arbeit von Mielke [202] zeigen auf, dass Haptik hörgeschädigten Personen die Möglichkeit bietet, Informationen zu vermitteln, ohne dabei auf auditive Signale angewiesen zu sein. Somit wären Hörgeschädigte eine Gruppe, für die sich die Nutzung von Haptik in der virtuellen Umgebung besonders gut eignen kann.

Um bisher bestehende therapeutische Anwendungen sinnvoll durch Haptik zu ergänzen, sollten noch folgende Fragen beantwortet werden:

1. Sofern haptisches Feedback die Immersion beeinflusst, welche Art haptischer Technologie erzeugt den größten Immersionseffekt?
 - Wie bereits die Forschungsergebnisse des State of the Art vermuten lassen, kann Haptik zu einer Steigerung der Immersion führen. Jedoch ist in den meisten Fällen immer Haptik gegenüber dem Wegbleiben von Haptik geprüft worden. Es gibt kaum Studien, welche verschiedene haptische Techniken gegenüber stellen. Da insbesondere das vibrotaktile Feedback und das Force Feedback derzeit am häufigsten auf dem Markt vertreten sind, beschränkt sich diese Frage vorerst auf diese Techniken.
2. Ist der Aspekt der Individualisierung bei Haptik zu berücksichtigen?
 - Wie ebenfalls innerhalb der Forschung diskutiert wird, ist die Individualisierung ein wichtiger Faktor, welcher den VR-Therapieerfolg beeinflussen kann. Jedoch konnten keine Forschungsarbeiten gefunden werden, die sich mit Individualisierung und haptischer Technologie auseinandersetzen. Welche Faktoren nehmen hierbei Einfluss oder ist die Individualisierung bei einer solchen Technik vernachlässigbar?

Zur Beantwortung dieser Fragen sind eine Vielzahl eigener Publikationen hervorgegangen. Diese setzten sich mit einigen der hier benannten Aspekte auseinander und können in Kapitel 12 eingesehen werden. Die Forschung wurde bereits kontextualisiert und die Inhalte kurz skizziert.

6 Konzeptentwicklung

Nachdem die Forschungsfragen konzipiert und die aktuelle Forschung betrachtet wurde, musste ein Konzept geschaffen werden, dass nun die Fragen zur haptischen Integration in therapeutischen VR-Anwendungen adressiert. Hierzu wurde ein stufenweiser Ablauf entwickelt, beginnend mit einem ersten Einstieg in das Thema durch bereits etablierte Technik.

6.1 Erste Schritte

In mittlerweile fast allen Controllern, aber auch in Smartphones werden integrierte Vibrationsmotoren genutzt, um dem Nutzer Informationen zu übermitteln. Auch in der virtuellen Realität ist dieser Trend bereits angekommen und viele der auf dem Markt verfügbaren VR-Controller enthalten ansteuerbare Vibrationsmotoren, über die mit unterschiedlichen Vibrationsmustern verschiedenes Feedback übermittelt wird. Da diese Technik bereits seit der Veröffentlichung der meisten HMDs genutzt wird, bietet dies den optimalen Einstiegspunkt in das Thema der Haptik. Das Ansprechen und Nutzen von Vibrationsmotoren, der Umgang mit Haptik innerhalb von Virtual Reality-Anwendungen und die Kombination dieser Technik mit psychologisch sinnvollen Anwendungen soll der erste Schritt innerhalb dieser Arbeit sein, um sich dem Thema anzunähern.

6.2 Wahl der haptischen Technologie

Nachdem ein erster Einstieg in die Entwicklung mit haptischer Technologie gelungen ist, soll der Fokus weg von konventioneller Haptik hin zu den neuen Technologien gelegt werden, mit der sich diese Arbeit primär beschäftigen möchte. Da jedoch eine Vielzahl an Geräte auf dem Markt zur Verfügung stehen, ist im nächsten Schritt eine Auswahl von Hardware erforderlich, da diese Arbeit nicht den Umfang besitzt, alle bisher vorgestellten Modelle zu betrachten. Aus dem Kapitel State of the Art ergibt sich, dass haptische Handschuhe und Anzüge derzeit im Fokus der Entwicklung und Forschung stehen, weswegen diese für die Arbeit gewählt wurden. Daraus lässt sich ableiten, dass diese Techniken in den nächsten Jahren an immer mehr Bedeutung gewinnen könnten, was einer Einbindung im therapeutischen Feld entgegenkommen würde. Darüber hinaus sind der Preis und die Praktikabilität entscheidende Faktoren hinsichtlich der Anschaffung für therapeutische Praxen. So sollte die Technik erschwinglich und möglichst platzsparend

sein, um auch in kleineren Praxen nutzbar zu sein. Verschiedene Traggrößen der haptischen Gerätschaften könnten Platz wegnehmen und zusätzliche Kosten bedeuten, die nicht von allen Praxen getragen werden können. Darüber hinaus ist eine Unterstützung von verschiedenen VR-Systemen notwendig, damit Praxen mit bereits bestehenden VR-Systemen keine Nachteile haben. Weiterhin soll die Technik auch von wenig technikaffinen Personen gewartet und genutzt werden können.

6.2.1 Auswahl der haptischen Handschuhe

Die Haptik der etwas älteren haptischen Datenhandschuhe basieren wie die Controller auf vibrotaktilen Feedback. So können Widerstände, Objekte und Informationen durch einfache Vibrationen an den Nutzer herangetragen werden. Die neueren Technologien nutzen häufig bereits eine Form des Force Feedback, wodurch Widerstände durch das physische Zurückhalten der Finger simuliert werden. Da dies die beiden am weitesten verbreiteten Formen von haptischer Rückmeldung sind, sollten auch die beiden zu vergleichenden Technikpaare jeweils eine dieser Technologien bereitstellen. Durch die ausführliche Recherche und die zuvor besprochenen Punkte wurden die folgenden Testpaare ausgewählt, die in einem späteren Teil der Arbeit, in Kapitel 9, im Detail vorgestellt werden:

- MANUS Prime X Haptic VR
- SenseGlove Nova

6.2.2 Auswahl der haptischen Anzüge

Hinsichtlich der haptischen Anzüge ist derzeit eine Form von Force Feedback nicht möglich. Jedoch werden hier andere Optionen bereitgestellt. Gegenüber dem vibrotaktilen Feedback gibt es auch die Möglichkeit von thermalen Eindrücken oder die Option von Elektrostimulation. Diese sind besonders spannend zu betrachten, da diese Optionen am Markt kaum anzutreffen sind. Darüber hinaus unterscheidet sich diese Art der Haptik grundlegend von anderen, bereits besprochenen Ansätzen. Wie in einem Paper von Kim et al. [164] berichtet, kann thermale Feedback zu einer realistischeren und eindringlichen Erfahrung in der VR beitragen. Dementsprechend sollte eine dieser neuen Technologien dem vibrotaktilen Feedback entgegengestellt werden. So wurde im Bereich der haptischen Anzüge die folgenden Testpaare ausgesucht:

- TESLASUIT
- TactSuit X40

6.3 Einbindung und Vergleich der Technologie

Nach der Auswahl der einzelnen Modelle werden die Einbindung der ausgewählten Technik und ein entsprechender Vergleich angestrebt. Vor- und Nachteile sowie die Herausforderungen und Chancen der Umsetzung in virtuellen Anwendungen sollen durch die technische Integration herausgearbeitet werden. Da es hierzu bisher kaum Literatur gibt und die bestehenden Forschungsarbeiten meiste ihren Fokus auf eigene, nicht kommerziell verfügbare Hardware legen, muss diese Forschungslücke so gut wie möglich geschlossen werden.

6.4 Integration in therapeutische Anwendungen

Im letzten Schritt dieser Dissertation steht die sinnvolle Integration der ausgewählten haptischen Technik in bereits bestehende oder noch in Entwicklung stehenden VR-Therapie-Anwendungen aus. Durch das Einbinden und Vergleichen mit den konventionellen Eingabegeräten kann schlussendlich die gewählte Technologie im Anwendungsfeld evaluiert werden.

Anmerkung

Durch die Covid-19-Pandemie, den anhaltenden Krieg zwischen Russland und der Ukraine, so wie der Chipknappheit, ergaben sich einige Herausforderung bei der Umsetzung des vorgestellten Konzepts. Insbesondere die Anschaffung der Hardware wurde verzögert, aber auch die Umsetzung von Studien war erschwert. So wurde die Entscheidung getroffen, den Fokus auf die Nutzbarkeit der haptischen Technik und die Integrationen zu legen, um Ideen und Tendenzen auch durch geringere Teilnehmerzahlen in den Studien herausarbeiten zu können. Die so entstehenden Ergebnisse können bereits bestimmte Annahmen aufzeigen, die im Forschungsfeld weiter verfolgt werden können.

7 Eine neuartige Technologie: Der TESLASUIT

7.1 Einleitung

Auch wenn die Konzeption einer therapeutischen Anwendung mit haptischer Integration deutlich später im Verlauf des Konzepts dieser Arbeit aufgeführt wird, wird dennoch an diesem Punkt mit der Erläuterung der Integration des TESLASUITS begonnen. Das erste Projekt zur Einarbeitung in das Thema „Haptik“ spielt im späteren Verlauf im Kapitel 11 dieser Arbeit noch eine wichtige Rolle, weshalb dies erst später im Detail beschrieben wird.

Die Integration des TESLASUITS folgte kurz nach der Einarbeitung in das Themenfeld der Haptik und war die erste haptische Technologie, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde. Aufgrund des großen Funktionsumfangs des Anzugs wurde die Einbindung direkt in einer neuen Anwendung mit therapeutischem Ansatz umgesetzt, um den Aspekten des Anzugs, die im Folgenden im Detail aufgeschlüsselt werden, gerecht zu werden.

7.2 Vorstellung des TESLASUITS

Der Ganzkörperanzug TESLASUIT der Marke *TESLASUIT* [332, 333] wurde bereits im Kapitel 4.4.2 Haptische Anzüge und Westen betrachtet. Das zweiteilige Haptiksystem, bestehend aus einer Jacke und einer Hose, zeichnet sich insbesondere durch das taktile Feedback durch 80 Elektrostimulationskanäle aus. Zusätzlich verfügt der Anzug über Peltierelemente, um die Temperatur des Anzugs spürbar zu verändern. Die Nutzung von Haptik durch Stromimpulse war zum Beginn dieser Arbeit im Jahr 2020 ein Alleinstellungsmerkmal auf dem Markt. Durch die Impulsbreite von 1-260ms pro Kanal können so unterschiedlichste Effekte simuliert werden. Von der Firma *TESLASUIT* werden bereits 25 dieser Eindrücke als Programmbaustein bereitgestellt, die einige Möglichkeiten demonstrieren. Darunter die Simulation von Regen, von Elektrizität oder auch Feuer. Zusätzlich bietet der Anzug Motion Capturing (Bewegungsaufnahmen) und das Messen von physiologischen Daten. So können der Herzschlag pro Minute (BPM) und die Pulsfrequenzvariabilität (PRV) des Benutzers gemessen und aufgezeichnet werden. Das Developer-Kit mit haptischem Anzug ist für \$12,999 erhältlich und war die teuerste Anschaffung im Bereich der Haptik im Rahmen dieser Arbeit. Da der Anzug eng anliegen muss, werden insgesamt 12 Größen angeboten. Die dadurch entstehenden hohen Anschaffungskosten und der Platzbedarf könnten insbesondere für therapeutische Praxen

hinderlich sein. Jedoch unterscheidet sich diese Art von haptischer Technologie zu anderen Ansätzen auf dem Markt so stark, dass sich im Rahmen dieser Arbeit dennoch für die Anschaffung entschieden wurde, um sie im Rahmen dieser Arbeit zu evaluieren und mögliche Chancen und Herausforderungen herauszuarbeiten.

7.3 Forschungsansatz

Die Möglichkeiten des Motion Capturings, die Aufnahme von Vitaldaten sowie haptisches Feedback in Form von Temperatur und Elektroimpulsen kann im Therapiebereich unterschiedlich genutzt werden. Da das Thema der Phobien zu Beginn dieser Arbeit im Fokus stand, entstand die Idee, einen Demonstrator zu entwickeln, der eine Expositionstherapie mit der neuen haptischen Technologie verband.

Die Exposition, die als Teil der Verhaltenstherapie gilt (siehe Kapitel 3.2.4) ist kurz zusammengefasst, die Konfrontation des Phobikers mit dem Angstreiz in einem sicheren Umfeld. Dazu gibt es meist unterschiedliche Abstufungen. Beispielsweise kann bei der Spinnenphobie zunächst mit Bildern gearbeitet werden, bevor eine echte Spinne zum Einsatz kommt. Jedoch ist es schwer, zwischen einigen Expositionsschritten gute Abstufungen zu finden. Von Spinnenbildern zu der angstfreien Interaktion mit einer echten Spinne am Ende einer Exposition ist ein großer Schritt für die Patienten. Daher bestand die Idee ein in-virtuo Demonstrator mit einer virtuellen Spinne zu entwickeln, welcher die haptische Wirkung des TESLASUIT nutzt und möglicherweise vor der Konfrontation mit der echten Spinne eingesetzt werden kann.

7.4 Ausgestaltung des Szenarios

Um alle Features des Anzugs ausgiebig nutzen zu können, musste ein Szenario entwickelt werden, das eine Exposition bietet, die Gebrauch von den haptischen Elementen des Anzugs macht. Die erste Idee bestand darin, die Spinne über den Körper des Anwenders laufen zu lassen und während ihrer Bewegungen einen leichten haptischen Impuls an ihrer Position auszusenden. So könnte die Haptik via Elektroimpulse und Peltierelementen sowie das Motion Capturing, also die aufgezeichneten Bewegungen des Nutzers, bereits ausführlich getestet werden. Die Vitaldaten könnten zusätzlich über den gesamten Verlauf aufgezeichnet werden. Da die gemessene Herzrate auch als Indikator für Angst verwendet werden kann, ergibt sich daraus ein vollständiges Bild.

7.4.1 Schritte der Exposition

Da die erste Idee, die Spinne über den Arm laufen zu lassen, jedoch eine direkte Konfrontation mit der Spinne auf dem Körper bot, ohne eine Vorwarnung oder eine Möglichkeit, dieser Situation innerhalb der virtuellen Welt zu entkommen, wurde entschieden, die Exposition in mehreren kleinen Schritten einzuleiten, um dem Phobiker die Möglichkeit zu geben, sich frei zu entscheiden, wie weit er gehen möchte. Insgesamt wurden hierfür vier Expositionsschritte festgelegt, welche die Patienten in diesem Szenario durchlaufen können:

1. **Beobachten der Spinne in einem natürlichen Umfeld**

Das Beobachten und Annähern als erster Schritt bei der Konfrontation.

2. **Erste Interaktion mit der Spinne - Überstülpen eines Glases / Wegnehmen eines Glases**

Hier können Patienten lernen, die Situation zu kontrollieren und mit der Spinne zu interagieren.

3. **Erste Berührung mit der Spinne - Spinne zur Hand krabbeln lassen**

Eine erste kontrollierte Berührung mit der Spinne

4. **Finale Interaktion - Spinne über den Arm krabbeln lassen**

Die maximale Konfrontation, in welcher die Spinne weniger kontrolliert mit dem Patienten interagiert.

7.5 Programmiertechnische Umsetzung

Nachdem das Szenario genau definiert war, wurde dann mit der Umsetzung des Demonstrators begonnen. Hierzu wurde die Entwicklungsumgebung *Unity* genutzt. Die Anwendung wurde auf der Version 2019.3.15f1 entwickelt. Primär wurde auf einem Laptop mit einem Intel i9 Prozessor und einer *NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU* gearbeitet, auf welchem für die *HTC VIVE Pro* [135] entwickelt wurde. Hierbei wurde das *TESLASUIT Developer Kit* mit einem Männeranzug in Größe L mit der Versionsnummer 4.5.4 verwendet. Zur Verbindung des Anzugs mit dem Rechner wurde das firmeneigene Softwarebundle *TESLASUIT Legacy SDK* verwendet, was zum Entwicklungszeitpunkt 2020/2021 die aktuellste Version nutzte. Die damals verwendete Version 2.0.1 dieses *Unity* Plug-in ist nicht mehr auf der Seite verfügbar.

Raumdesign

Um die Vorteile der virtuellen Realität zu nutzen und die Konfrontation mit der Spinne in ein realistischeres Umfeld zu transportieren, wurde entschieden, einen Wohnbereich in der virtuellen Welt nachzubauen. So kann eine Exposition in ein glaubwürdiges Umfeld übertragen werden. Häufig sind es die privaten Räume, die in welchen Spinnen anzutreffen sind und Spinnenphobiker mit der Situation konfrontiert werden. Dementsprechend soll dieses Umfeld den Realismus heben und bei der Übertragbarkeit der Erfahrungen aus der virtuellen Welt in das reale Leben unterstützen.

Zusätzlich sollen durch das gewählte Szenario die Peltierelemente und haptischen Elemente des TESLASUIT ausgiebig genutzt werden. Dementsprechend wurden Objekte wie ein Kamin, ein Ventilator, ein kleiner Wohnzimmerbrunnen mit Wasser und Regen in das Szenendesign aufgenommen, die unterschiedliche haptische Eindrücke vermitteln können sollen.

So entstand ein Wohnzimmer mit angeschlossenem Essbereich und Küche, in welchen die haptischen Elemente möglichst natürlich platziert werden konnten (siehe Abbildung 20). Anschließend wurde der Tisch für die Exposition in die Mitte des Raumes gesetzt, auf welchem die Spinne während der Anwendung herumkrabbelt.

Alle verwendeten Modelle wurden entweder aus dem *Unity* Asset Store [353] oder von Seiten wie Turbosquid [340] und CGTrade [39] kostenfrei heruntergeladen oder in Blender (siehe Kapitel 3.3.4) selbst modelliert.



Abbildung 20: Darstellung des Expositionsraums in VR

TESLASUIT Launcher

Nachdem die Szene konzipiert und erstellt wurde, folgte die Integration des haptischen Anzugs. Hierfür muss dieser im ersten Schritt mit dem Computer verbunden werden. Dazu dient der *TESLASUIT Launcher*, welcher neben der Verbindung zusätzlich Tools für die vorgestellten Funktionalitäten bereitstellt, darunter für die Kalibrierung der Elektrostimulation und der Peltierelemente, für das Erstellen von haptischen Eindrücken, für das Motion Capturing und für die Aufnahme der Vitaldaten. Zur Einbindung der Funktionen in ein Programm bietet die Firma *TESLASUIT* eine eigene SDK für die gängigen Game Engines und Programmierschnittstellen wie *Python* und *C*.

Einbinden des TESLASUITS in das Programm

Zur Nutzung des Anzugs in Verbindung mit VR konnte das zuvor besprochene *Unity* SDK verwendet werden. Diese bietet alle notwendigen Skripte zur Einbindung und Nutzung des Anzugs innerhalb der Szene. Das wohl wichtigste Skript ist hierbei das *SuitAPIObject*³. Dies ermöglicht die Verbindung mit der Jacke und Hose zum Programm. Über dieses kann der Verbindungsstatus des haptischen Anzugs ausgelesen und auf die weiteren Funktionen zugegriffen werden.

Peltierelemente

Die Peltierelemente konnten bei der Integration des Anzugs in das Programm nicht mehr angesteuert werden. Hierzu gab es keine weiteren Informationen von *TESLASUIT*, jedoch wurde dieses Feature später von der Produktseite entfernt. Dies schränkte die Möglichkeiten des gewünschten Feedbacks deutlich ein. Temperaturbezogene haptische Darstellungen wie Feuer und Regen konnten so nur noch über die Elektroimpulse simuliert werden. Auch weitere Ideen, die vor der Beschaffung überlegt wurden, wie das Simulieren von Körperwärme von virtuellen Avataren konnte so nicht mehr umgesetzt werden. Dies hätte einen Mehrwert für diese Arbeit erbringen können, da nach den Arbeiten von Kim et al. [164] temperaturbezogene Haptik zu einer Steigerung des Realismus führen kann und dies ein Grund für die Anschaffung dieses haptischen Gerätes war.

³Programmbausteine immer kursiv für eine bessere Lesbarkeit

Elektrostimulations-Feedback

Für den haptischen Eindruck mit elektrischen Impulsen werden die Skripte *HapticCollider* und *HapticMesh* des TESLASUIT SDKs benötigt. Diese werden dem Objekt zugeordnet, welches den Anwender in der Szene darstellt. Sie geben an, in welchen Bereichen des Körpers eine Berührung stattfinden kann und wann und auf welchen Teil des Körpers ein haptisches Feedback ausgestrahlt wird. Das *HapticDepthMaterial* hingegen liegt auf den Objekten, die zur haptischen Wahrnehmung führen sollen. Dementsprechend wurde der Spinne, dem Kaminfeuer, dem Regenbereich und auch dem Ventilator dieses Skript zugeordnet. Durch eine Kollision zwischen dem *HapticCollider* und einem Objekt mit einem *HapticDepthMaterial* wird dann passend ein haptischer Eindruck wiedergegeben. Es gab bereits vorgefertigte haptische Materialien, die ähnlich wie die in Kapitel 3.3.3 angesprochenen *Unity*-Materialien funktionieren. Die haptischen Materialien beinhalten hierbei jedoch keine Textur oder Materialinformation zur Darstellung, sondern die Informationen darüber, wie die Elektrostimulationskanäle des Anzugs bei Berührung reagieren sollen. Neben den vorgefertigten haptischen Materialien, die bereitgestellt werden, gibt es auch die Möglichkeit, über den *Haptic Editor* des *TESLASUIT Launchers* eigene haptische Materialien zu erstellen und in *Unity* zu importieren. Hierzu können die elektrischen Impulse durch die Definition der Körperbereiche und durch Änderung der Frequenz, der Amplitude, der Pulsweite und der Dauer auf die spezifische Empfindung angepasst und über den Verlauf hinweg verändert werden. Jedoch ist die selbst Erstellung dieser Materialien sehr aufwendig und benötigt eine gewisse Einarbeitungszeit. Daher wurde sich bei vielen haptischen Eindrücken auf bereits vorgefertigte Sets berufen, um ein bestmögliches Ergebnis zu ermöglichen.

Bodytracking

Über das *SuitMocapSkeleton*-Skript können die Bewegungen des Nutzers kalibriert und in die virtuelle Welt übertragen werden. Dies war besonders wichtig, da die haptischen Eindrücke abhängig von den Bewegungen des Nutzers passieren sollten. Sollte der Arm, auf dem die Spinne läuft, bewegt werden, so sollte weiterhin das haptische Gefühl mit den realen Bewegungen übereinstimmen. Darüber hinaus ist es auch wichtig, dass die Personen einen virtuellen Arm besitzen, da die Spinne ansonsten in der Luft laufen würde. Dies könnte sich nachteilig auf die Immersion auswirken. Dementsprechend war auch eine virtuelle Darstellung des Patienten vonnöten. Beides wurde von den internen Skripten von *TESLASUIT* angeboten, jedoch war es nicht vorgesehen, die Haptik und Bewegungserfassung gemeinsam zu nutzen. Dementsprechend musste zunächst der Avatar,

der von *TESLASUIT* beigelegt wurde, mit entsprechenden Skripten ergänzt werden. Jedoch war hier das Motion Capturing im Beispiel des SDKs nicht für freie Bewegungen innerhalb des virtuellen Raumes ausgelegt.

Zusätzlich war die Ausrichtung des Anzugs in der virtuellen Welt beim Starten der Anwendung nicht einheitlich. Zwar wurde versucht, die Ausrichtung des virtuellen Körpers an die Ausrichtung des HMDs anzupassen, jedoch konnte keine verlässliche Möglichkeit gefunden werden. Auch Elemente wie die Hände konnten nicht verlässlich abgebildet werden und wirkten häufig verdreht. Da zwar die Bewegungen vom Anzug verlässlich erkannt, aber nicht richtig rotiert waren, wurde entschieden, ein zusätzliches Programmpaket (Asset) für das Bodytracking zu verwenden, welches zwar die Trackpunkte des Anzugs übernahm, diese jedoch durch Algorithmen passend an die Position und Rotation der Brille anpasste. Das verwendete SDK namens *Final IK* [253] kann neben den Bewegungen des Anzugs auch die Position der Brille und der Controller nutzen, um einen realistischen Eindruck der Bewegungen zu übergeben. Für eine realistische Darstellung der Bewegungen des Nutzers wurden die Positionen der Ellbogen des Anzugs sowie der Controller und die des VR-HMDs als Referenzpunkte genutzt.

Zusätzliche Anpassungen des Avatars

Nachdem die Position der Person und ihre Bewegungen möglichst realistisch in der virtuellen Welt dargestellt werden konnten, mussten Anpassungen an dem Modell selbst getroffen werden. Dazu wird das Modell passend auf die Personengröße des Testers skaliert. Dies ermöglicht Personen mit unterschiedlichen Körpergrößen, die Anwendung zu nutzen. Das dafür entwickelte Skript *ScaleBody* errechnet aus der HMD Höhe und der Größe des Avatars (in diesem Fall 1.8m) die passende Größe des Modells für den aktuellen Nutzer und passt dieses an.

Ebenfalls musste die Position des Avatarkopfes hinter die Kamera geschoben werden, damit das Sichtfeld des Nutzers nicht gestört wird. Dazu wurde ein Hilfsobjekt im Kopf des Avatars generiert, mit welchem die Kopfposition des Avatars passend zur Brille nach hinten verschoben wird, sodass dieser aus dem Blickfeld verschwindet. Zusätzlich wurde die Clipping-Distanz angepasst, die ganz nahe Objekte vor der Kamera ausblendet, um mögliche Pixelfragmente des Kopfes bei Bewegungen auszublenden. Diese Anpassungen sollen für eine bessere Körperpräsenz sorgen, also dem Gefühl, dass der echte Körper in der virtuellen Welt anwesend ist.

Umsetzung der Spinne

Das Verhalten der Spinne war von besonderer Relevanz bei der Entwicklung dieser Exposition. Da die Spinne der angstausslösende Reiz für die Phobiker sein würde, war es wichtig, dass sie sich möglichst realistisch verhielt. Die Spinne wurde wie viele andere Objekte aus einem bereits bestehenden Asset entnommen. Dies hatte den Grund, dass das selbst Selbstmodellieren und -animieren einer realistischen Spinne sehr komplex ist und die Spinne für die Anwendung möglichst glaubwürdig wirken sollte. Das Modell von „Spider Character Spiders Pack - Fantasy RPG“ [234] bot neben einigen Spinnenmodellen bereits einige Animationen wie eine Idle-Animation und Laufanimationen an, die ohne weitere Bearbeitung so verwendet werden konnten. Eine Idle-Animation ist dabei ein Animationszyklus, der das Verhalten eines Modells beschreibt, wenn keine direkte Handlung erwünscht ist. Diese zeichnen sich meist durch langsame, sich wiederholende Bewegungen aus, um die Atmosphäre der Anwendung natürlich und lebendig zu halten. Lediglich die Farbe und Textur der Spinne wurden angepasst.

Ablauf der Anwendung

Im Folgenden wird die Umsetzung der vier in Abschnitt 7.4.1 festgelegten Schritte der Exposition anhand der programmiertechnischen Umsetzung im Detail erläutert. Diese Schritte entsprechen der finalen Version dieses Demonstrators und konnte dementsprechend umgesetzt werden. Zur Entwicklungszeit wurde auch regional darüber berichtet [245], was das Interesse der Gesellschaft an dieser Thematik offenlegt.

1. Um die Aufmerksamkeit des Nutzers auf die Beobachtung der Spinne zu lenken, wurde entschieden, die Spinne über den Tisch krabbeln zu lassen. Somit ist sie das einzig bewegte Objekt im Raum. Da der Tisch sehr zentral liegt, kann die Spinne recht schnell entdeckt und beobachtet werden. Dazu wurden verschiedene Wegpunkte auf dem Tisch platziert, die zufällig angesteuert werden. Für eine natürlichere Darstellung variiert die Reihenfolge der Wegpunkte stetig, damit die Wegpunkte und die Bewegungen nicht zu vorhersehbar werden. Zusätzlich wird die Distanz vom Nutzer zur Spinne jeden Frame gemessen. So kann die Annäherung an die Spinne detailliert dokumentiert werden.

2. Um die erste Interaktion mit der Spinne auszuführen, wurden virtuelle Gläser auf dem Tisch platziert, welche über die Spinne gestülpt werden können. Eines der Gläser ist nicht-transparent, wohin gegen das andere einen Blick auf die Spinne gewährleistet. Sollte das Glas mit Collider über die Spinne gestülpt werden, wird sie in ihre Idle-Animation gesetzt und bleibt an der spezifischen Stelle stehen. Sollte das Glas wieder angehoben werden und die Spinne den Collider verlassen, folgt sie ihrer ursprünglichen Routine und läuft weiter über den Tisch.

3. Damit die Spinne, falls von dem Nutzer gewünscht, ihren Weg auf den Arm finden kann und der Nutzer seine erste haptische Interaktion mit der Spinne hat, wurde eine Stelle auf dem Tisch markiert, die bei Berühren der Hand die Routine der Spinne verändert. Sollte der Anwender seine Hand an die spezifische Stelle legen, bewegt sich die Spinne von ihrem aktuellen Wegpunkt direkt zur Position der Hand hin und krabbelt auf einen Wegpunkt direkt auf dem Handrücken, an welcher die Spinne stehen bleibt und erneut die Idle-Animation annimmt. Sollte die Hand vorher weggezogen werden, kehrt die Spinne zu ihrer ursprünglichen Routine zurück und läuft einen neuen Wegpunkt an.

4. Die letzte Interaktion ist das Bewegen der Spinne über den Arm des Nutzers. Sobald der Anwender die Hand anhebt, während die Spinne auf dem Handrücken sitzt, beginnt die Spinne sich per Wegpunkte einen Weg über den Arm zu bahnen. Dieser ist gradliniger, da der Arm zwar Fläche bietet, sich die Spinne jedoch durchgehend im Blickfeld des Anwenders bewegen sollte. Eine besondere Herausforderung war es, dass sich die Wegpunkte durch die Bewegungen des Nutzers und somit des Avatars stetig ändern können. Dementsprechend wurde eine passende Methode entwickelt, die dies berücksichtigt. Hierbei wird in jedem Frame die Position erneut zwischen der aktuellen Position der Spinne und dem Zielpunkt errechnet. Durch diese permanente Anpassung der Positionen per Frame kann verhindert werden, dass die Spinne im Arm verschwindet oder in der Luft hängen bleibt, sofern sich der Nutzer bewegt. Jedoch kann so die Spinne auch nicht vom Arm geschüttelt oder gestrichen werden. Um die Spinne wieder abzusetzen, muss die Hand erneut auf die markierte Stelle auf dem Tisch gelegt werden, wodurch sie zurück zum Handrücken und von dort aus wieder auf den Tisch krabbelt. Ab diesem Punkt folgt sie wieder der ursprünglichen Routine und steuert einen ausgewählten Wegpunkt an.

7.6 Herausforderungen der Technik

Bei der Nutzung des TESLASUIT sind einige Herausforderungen herausgestellt, welche sich auf die Entwicklung, der oben beschriebenen Expositionstherapie ausgewirkt haben. Zum einen war die Kalibrierung der Haptik des Anzugs sehr aufwendig. Insgesamt hat die Kalibrierung aller Elemente über 30 Minuten gedauert. Um den haptischen Effekt optimal an die Empfindungen des Nutzers anzugleichen, muss für jedes einzelne haptische Element die Stärke angepasst werden. Zwar kann die Stärke für alle Elemente gemeinsam angepasst werden, jedoch ist bei internen Testungen in der Arbeitsgruppe schnell festgestellt worden, dass die Kalibrierung sehr individuell ist und für jede Person angepasst werden sollte. Da es keine Möglichkeit gibt, diese Profile abzuspeichern, musste dieser Vorgang vor jeder Testung wiederholt werden.

Die Erstellung von haptischen Materialien, die spezifische Empfindungen bei den Nutzern auslösen sollen, erforderte darüber hinaus eine hohe Einarbeitungszeit. Die Möglichkeiten, jeden einzelnen haptischen Aktor ansprechen zu können und spezifische Verläufe des Stromimpulses darzustellen, erlaubt viel Variation. Diese Vielfalt kann Möglichkeit wie Herausforderung sein, da die vielen Optionen viel Freiheit, aber auch potenzielle Überforderung bedeuten können.

Die Verwendung von Strom birgt ebenfalls einige Risiken. Eine fehlerhafte Kalibrierung kann schnell zu Unwohlsein oder Schmerzen führen. Insbesondere bei sehr sensiblen Personen muss daher aufgepasst werden. Auch von der Nutzung des Anzugs von Personen mit Implantaten wäre abzuraten. Zusätzlich wäre ein Sicherheitsmechanismus nützlich, da mehrfach beim Entwickeln der Fall eingetreten ist, dass der Entwickler unter Strom gesetzt wird und gegebenenfalls nicht mehr die Hand bewegen konnte. Aus diesem Grund wurde später bei der Entwicklung auf ein langes Stromkabel zur Powerbank gesetzt, welches einfach mit der anderen Hand herausgezogen werden konnte.

Letztlich ergaben sich auch während der Implementierung einige Herausforderungen. Insbesondere die beschriebene Nutzung des Motion Capturings hat viel Zeit in Anspruch genommen und wurde am Ende durch ein externes Asset umgesetzt. Aber auch der zu dieser Zeit kaum dokumentierte Code und die nicht deterministische Ausführungsreihenfolge des Programms führte zu Problemen und musste händisch behoben werden. Hier zeigt sich, dass die Technik noch in einem Wandel steckt, wodurch sich über die Zeit mit verschiedenen SDK-Versionen beschäftigt wurde.

7.7 Ergebnisse

Der konzipierte Demonstrator wurde nur innerhalb der Forschungsgruppe verwendet und getestet. Hierbei wurde die Usability der Anwendung sowie die Wirkung des Anzugs gemeinsam besprochen. Insgesamt wurden alle vier Expositionsschritte durchlaufen und nacheinander getestet, bis die Spinne wieder auf dem Tisch abgesetzt wurde.

Der haptische Eindruck konnte hierbei überzeugen. Effekte wie der Regen fühlten sich glaubhaft an. Auch das Bewegen der Spinne über den Arm wurde positiv aufgenommen und konnte durch die haptische Wahrnehmung genau geortet werden. Insbesondere beim Wind und dem Kaminfeuer fehlte es jedoch an den Peltierelementen, die für das verschiedene Temperaturempfinden hätten sorgen können. Dennoch war das Feedback hinsichtlich des haptischen Eindrucks durch Elektroimpulse sehr positiv. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der TESLASUIT für die Forschung eine sehr interessante Technologie sein kann und viel Potenzial bietet, jedoch derzeit noch nicht für den Praxissalltag geeignet ist. Hierfür gibt es einige Gründe, die im Folgenden einmal aufgeschlüsselt werden:

Die aufwendige Kalibrierung und die nicht speicherbaren Profile erschweren die Durchführungen von Therapien. Die Kalibrierung benötigt ein gewisses Technikverständnis und muss sehr gewissenhaft durchgeführt werden, damit die haptischen Eindrücke für den Patienten nicht während der Kalibrierung oder der Nutzung der Anwendung unangenehm oder schmerzhaft sind.

Auch die Aktualisierung der Software und Hardware erfordert einiges an Technikerfahrung und hat innerhalb der Testungen häufiger zu Problemen geführt.

Der Preis birgt zusätzlich einen hohen finanziellen Aufwand. Da der Anzug eng an der Haut anliegen muss, muss die Passgröße gut gewählt sein. Dadurch ergeben sich sechs unterschiedliche Anzüge pro Geschlecht, die möglicherweise angeschafft werden müssten, um jede Größe und jedes Geschlecht zu bedienen. Zusätzlich sollte im besten Fall kaum Kleidung unter der dem Anzug getragen werden, um eine bestmögliche Leitfähigkeit zu gewährleisten. Auch wenn die Anzüge gewaschen werden können, sollte ein Anzug aus hygienischer Sicht nicht nacheinander von mehreren Personen getragen werden, wodurch sich die Anzahl an benötigten Anzügen summieren könnte.

Letztlich gibt es derzeit auch kaum unterstützte Software und durch den Kostenaufwand und einige der genannten Probleme ist derzeit nicht davon auszugehen, dass dieser Zustand sich in der nächsten Zeit verbessert. So müsste explizit Software für gewisse Zwecke entwickelt werden, für die es Entwickler benötigt, die die Zeit und den Arbeitsaufwand in die Technik investieren.

8 Gedächtnistraining mit Haptik

8.1 Einleitung

Die zweite zu betrachtende haptische Körperbekleidung war die haptische Weste namens TactSuit X40 der Firma *bHaptics*. Diese wurde deutlich später als der TESLASUIT angeschafft und sollte zum Vergleich ein vibrotaktiler Feedback nutzen. Jedoch wurde von der Idee abgesehen, die Weste in der gleichen Expositionsanwendung wie den TESLASUIT zu nutzen (siehe Kapitel 7). Zum einen konnte die entwickelte Exposition bereits zeigen, dass sich der TESLASUIT derzeit noch nicht für den Praxisalltag eignet (siehe Kapitel 7.7), zum anderen konnte das entwickelte Szenario nicht gut auf die Weste übertragen werden. Insbesondere die Arme des Nutzers werden in dem entwickelten Expositionstherapie-Demonstrator beansprucht. Dort findet die stärkste haptische Interaktion mit der Spinne statt. Dies auf eine Weste zu übertragen, die keinerlei haptisches Feedback auf die Arme senden kann, erweist sich ohne weitere Add-ons als unmöglich und nicht zielführend.

Dementsprechend wurde ein neuer Ansatz gewählt. In diesem Fall wurde weniger auf die Stärkung der Immersion durch die haptischen Eindrücke gesetzt und mehr auf die Möglichkeit, durch haptische Eindrücke eine Unterscheidbarkeit von Situationen oder Kontexten zu schaffen. Ziel war es, die Wirkung auf den Nutzer dabei zu untersuchen. Eine Anwendung, die von solch einer Funktionalität profitieren könnte, ist eine bereits von der Autorin implementierte Gedächtnistrainingsanwendung [267, 271], welche das Spiel „Memory“ in einen Virtual Reality-Kontext bringt. Mit persönlichen Memoiren und der Möglichkeit, unterschiedliche Wahrnehmungskanäle anzusprechen, soll so spielerisch das Fortschreiten von Demenz eingedämmt werden und allen Altersgruppen ein Zugang zum Gedächtnistraining gewährt werden. In der ursprünglichen Version konnten die Karten nur visuell und auditiv unterschieden werden. Durch die haptische Weste könnte nun auch haptisches Feedback genutzt werden, um die Unterschiede „fühlbar“ zu machen.

8.2 TactSuit X40

Der TactSuit X40 [22] der Firma *bHaptics* ist eine einteilige Weste, die bereits kurz in Kapitel 4.4.2 vorgestellt wurde. Durch 40 Haptikpunkte kann vibrotaktiler Feedback auf den Körper des Trägers ausgestrahlt werden. Die Weste wird seit dem Februar 2021 offiziell auf dem Markt vertrieben und unterstützt durch ihre Bluetooth 4.0 Low Energy Verbindung VR-Plattformen wie *SteamVR* [312] und die *Meta Quest* [196]. Zusätzlich kann die Weste durch ihre Anbindung über den AUX-Eingang für andere Anwendungen wie Videospiele, Filme oder Musik genutzt werden. Das haptische Gerät in Einheitsgröße wiegt 1,7 kg und kann durch zwei Laschen an jeder Seite auf verschiedene Körperformen eingestellt werden. Der wiederaufladbare Lithium Akku mit einer Kapazität von 9800 mAh besitzt eine Aufladezeit von fünf Stunden, kann dann insgesamt 18 Stunden vor der nächsten Aufladung genutzt werden. Mit einem Preis von \$499 ist die Weste im Vergleich zum TESLASUIT deutlich günstiger, jedoch können haptische Eindrücke nur auf den Oberkörper ausgesendet werden. Um diese Eindrücke zu ergänzen, bietet die Firma *bHaptics* zusätzliche haptische Hardware, die auch in Kombination mit der Weste genutzt werden kann. Sie decken das Gesicht, die Arme, Hände und Füße ab. Jedoch wurden diese Add-ons innerhalb dieser Arbeit nicht verwendet. Unter anderem da eine Vergleichbarkeit der alleinstehenden Hardware gegenüber anderen fair ermöglicht werden sollte.

Mit den genannten Aspekten erfüllt die Weste die Kriterien, die bei der Anschaffung berücksichtigt werden sollten, auch wenn ein direkter Vergleich der beiden haptischen Bekleidungen am Ende ausbleibt [358].

8.3 In-virtuo Gedächtnistrainingsanwendung - Grundlagen

Wie in den Grundlagen angesprochen, trägt die kognitive Leistungsfähigkeit auch zur psychischen Gesundheit bei (siehe Kapitel 3.2.5). Daher wurde ein VR-Gedächtnistraining entwickelt, das in Form eines „Memory“-Spiels umgesetzt wurde. Dabei werden die Teilnehmer in gewünschte virtuelle Umgebungen versetzt, in denen sie eine bestimmte Anzahl an Karten vorfinden. Ihre Aufgabe besteht darin, Paare zu finden, indem sie sich die Motive und Positionen der Karten einprägen. Zusätzlich werden Audiodateien verwendet, die den Merkprozess unterstützen sollen, indem jedem Motiv eine spezifische Audiodatei zugewiesen wird, die beim Aufdecken abgespielt wird. So können persönliche Memoiren in Form von Bildern und Musik genutzt werden, um das Gedächtnis zu trainieren

und die kognitive Leistungsfähigkeit zu steigern, aber auch um sich mit Erinnerungen auseinanderzusetzen, die sich negativ auf die psychische Gesundheit auswirken. Hierbei können anstelle positiver Bilder mögliche Trigger verwendet werden, die dann mit einem Therapeuten gemeinsam beim Spiel aufgearbeitet und besprochen werden können. Das in-virtuo Gedächtnistraining geht dabei stark auf den Faktor der Individualisierung ein. So wurde versucht, möglichst viele Optionen anzubieten, die diese Anwendung unabhängig von Erfahrung, Altersgruppe oder Gedächtnisleistung für jeden individuell zu einem möglichst guten Raum zum Lernen und Trainieren des Gedächtnisses macht. Darunter zählen Einstellungen zur Kartengröße für Menschen mit Sehschwäche oder auch Controllerbelegungen, die es auch mobil eingeschränkten Personen erlauben, die Anwendung im Sitzen zu nutzen. Zusätzlich existiert ein Level-System mit Belohnungen, um die Herausforderung an den Spieler anzupassen und die Motivation zu steigern. Das System erhöht durch erfolgreiches Abschließen der Gedächtnisaufgabe beim nächsten Durchgang die Anzahl an Kartenpaaren und somit der Herausforderung. Auch die persönlichen Memoiren, die als Kartenmotive eingeladen werden, stärken den Individualisierungsfaktor, aktivieren aber auch mehr Bereiche im Gehirn als das traditionelle Memory. So wird neben dem semantischen Gedächtnis, welches das Faktenwissen einer Person beinhaltet, auch das episodische Gedächtnis angesprochen, welches den autobiografischen Erinnerungen entspricht. Begleitet werden die Motive beim Aufdecken von Musik. Auch diese kann von den Probanden individuell ausgesucht werden und soll dazu beitragen, die Inhalte und Position der Karten einzuprägen. Die Kombination aus beispielsweise dem Bild der Hochzeit des Nutzers mit dem Lied des ersten Tanzes könnte Vorteile für den Merkprozess beinhalten.

Zusätzlich wurde auf die Theorie der Lerntypen von Vester [92] eingegangen, die bereits im Kapitel 3.2.2 ausführlicher besprochen wurden. Hiernach wird die Aufnahme von Reizen durch vier bestimmte Kanäle gesteuert: den visuellen, den auditiven, den kommunikativen und den motorischen Kanal. Diese vier fundamentalen sensorischen Komponenten sind grundlegend für alle Gedächtnisabläufe. Durch diese Elemente können Inhalte über das Ultrakurzzeitgedächtnis aufgenommen und an das Arbeitsgedächtnis weitergegeben werden. Jedoch sind die Ausprägungen der vier Kanäle bei allen Menschen unterschiedlich stark, wodurch jede Person anders lernt. Die Haptik könnte demnach ein Element darstellen, das die Wahrnehmung der Karten komplementiert und motorischen Lernern einen guten Zugang zum Gedächtnistraining via Haptik verschafft.

8.3.1 Ablauf des ursprünglichen VR-Gedächtnistrainings

Die Anwendung baut wie zuvor beschrieben auf einem „Memory“ auf. Nachdem der Testleiter ein neues Nutzerprofil erstellt oder ein bestehendes geladen hat, kann zwischen den unterschiedlichen Individualisierungsmöglichkeiten ausgewählt werden. Von der Wahl der Szene bis hin zur präferierten Steuerung kann die Anwendung konfiguriert werden. Zwei dieser Szenenoptionen können in Abbildung 21 angeschaut werden. Sobald alles, wie es der Proband wünscht, eingestellt ist, kann die eigentliche Anwendungsszene gestartet werden. Hier steht der Proband vor einem Tisch mit einer bestimmten Anzahl an Karten. Bei ersten Level sind dies 12 Karten, also insgesamt sechs Pärchen. Diese können durch den Controller aufgedeckt und angeschaut werden. Jedes individuelle Motiv, welches aus persönlichen Bildern besteht, die zuvor von dem Probanden eingeholt wurden, wird beim Aufdecken von einem individuellen Audio begleitet. Sobald zwei Karten aufgedeckt wurden, werden sie vom Programm verglichen. Handelt es sich hierbei um dasselbe Motiv, so sortiert das Programm die Karte aus. Andernfalls werden beide Karten wieder zugekehrt und der Spieler kann erneut zwei Karten aufdecken. Sollte eine Karte ein zweites Mal mit einem falschen Partner aufgedeckt werden, gilt dies als Fehlerpunkt. Diese werden im Hintergrund zusammengerechnet, um nach Beendigung den Erfolg des Spielers in drei unterschiedliche Ränge einzusortieren: Gold, Silber und Bronze. Diese werden durch eine Urkunde auf dem Tisch nach Beendigung der Spielrunde für den Nutzer visuell dargestellt. Sollte ein Spieler den Goldrang erreichen, steigt er ein Level auf. Demnach werden im nächsten Spieldurchlauf 4 Karten mehr auf dem Tisch platziert. Als zusätzliche Gamificationelemente werden durch die Ränge neue Kartenrückennotive freigeschaltet, die der Spieler anschließend für die nächsten Spielrunden variabel nutzen kann.



(a)



(b)

Abbildung 21: VR-Ansicht der (a)Weltraumszene und (b)Bergszene

8.4 Programmiertechnische Umsetzung

Nach der Vorstellung des VR-Gedächtnistrainings erfolgt nun die Integration des TactSuits X40 in die bestehende Anwendung. Hierbei wurde versucht, die eigentliche Funktionalität der Anwendung unverändert zu lassen und die Weste ergänzend zu integrieren. Zusätzlich wurden einige Optimierungen vorgenommen, die insbesondere die Nutzbarkeit der Anwendung erhöhen, um die Durchführung einer abschließenden Studie zu erleichtern. Hierzu wurde wie bei der originalen Anwendung die Entwicklungsumgebung *Unity* genutzt. Dazu wurde die Anwendung zuvor auf die Version 2021.3.3f1 geupdated. Primär wurde auf einem Laptop mit einem Intel i9 Prozessor und einer *NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU* gearbeitet, auf welchem für die *HTC VIVE Pro* [135] entwickelt wurde. Für die Einbindung des TactSuit X40 wurde das firmeneigene *Unity(SDK2)* verwendet, welches gemeinsam mit der angebundenen Software im Folgenden genauer erläutert wird.

bHaptics Player

Um den TactSuit X40 nutzen zu können, wird von der Firma *bHaptics* eine eigene Anwendung angeboten. Der *bHaptics Player* ist für die Verbindung zwischen Weste und Computer zuständig. Innerhalb dieser Anwendungen können unter anderem Systemupdates für die Hardware heruntergeladen und installiert werden. Ebenfalls können spezifische Konfigurationen für Anwendungen ausgewählt werden, darunter für VR-Spiele wie *Beat Saber* [317] oder *Half-Life Alyx* [123]. Einige Anwendungen werden hierbei direkt nativ unterstützt, für andere gibt es spezielle Modifikationen. Zum Zeitpunkt der Entwicklung wurden bereits 160 unterschiedliche Programme von der *bHaptic*-Weste unterstützt. Es können aber auch eigene Profile im *bHaptics Studio*, einem weiteren Tool von *bHaptics*, erstellt und angepasst werden.

bHaptics SDK 2.0 für Unity

Während der Anfangsphase der Entwicklung wurde das *Unity(SDK1)* verwendet. Allerdings stellte die Firma *bHaptics* die Unterstützung für diese Version ein. Daraufhin musste ein Update auf die zu diesem Zeitpunkt neu veröffentlichte Version 2.0 durchgeführt werden. Der größte Unterschied zwischen den SDK-Versionen ist die Einbindung und Verwaltung der haptischen Eindrücke. Zum Umstellen der SDK-Version gibt es ein Tutorial [222], welches die Überführung im Detail erklärt. Da Version 1.0 nicht mehr verwendet werden kann, wird im folgenden ausschließlich auf die Integration mit der Version 2.0 eingegangen.

Einbindung des TactSuit X40

Das *Unity (SDK2)* ermöglicht es, den TactSuit X40 mit der *Unity* Anwendung zu verbinden. Für die Organisation der Anwendungen, die den TactSuit X40 nutzen, kann auf der Website von *bHaptics* ein Nutzerprofil eingerichtet werden. Über dieses können dann die gewünschten *Unity*-Anwendungen über einen Code verknüpft werden, der in einem zugehörigen Reiter in *Unity* direkt eingetragen werden kann. Dies ermöglicht einen leichten und schnellen Zugriff auf die Funktionen in der Anwendung. Zusätzlich wird das Prefab [*bHaptics*] in der gewünschten *Unity*-Szene benötigt. Dies muss in die entsprechende Szene gezogen werden, um die Funktionalitäten der Weste im Programm nutzen zu können.

Erstellen von haptischen Materialien

Über das haus eigene Tool *bHaptics Designer* können im Webbrowser unter dem erstellten Nutzerprofil eigene haptische Materialien erstellt und verwaltet werden. Haptische Materialien sind ähnlich zu den *Unity*-Materials, beinhalten jedoch nur die Information darüber, wie die Weste auf ein gewisses Ereignis reagieren soll. Hier befinden sich genaue Angaben über die zu verwendenden Aktoren und ihrer Vibrationsstärke.

Über den Knopf „Create“ im *bHaptics Designer* kann ein neues Material erstellt werden. Anschließend kann dann über „Create Effect“ entweder über den sogenannten „Path Mode“ oder „Dot Mode“ jeder einzelne Motor des Suits angesprochen und miteinander verknüpft werden (siehe Abbildung 22). Über den Path Mode kann die haptische Wirkung über verschiedene Punkte hinweg gesteuert werden. Es entsteht ein fließender Impuls von einem haptischen Punkt zum anderen. Bei dem Dot Mode hingegen wird nur der spezifische Motor angesprochen. Insgesamt gibt es hier 20 taktile Punkte für die Brust und 20 weitere für den Rückenbereich. Sobald das gewünschte Muster (Pattern) erstellt ist, kann dieses noch weiter modifiziert werden. So kann die Geschwindigkeit des Patterns von konstanter Geschwindigkeit zu konstanter Zeit geändert werden und auch das Einspielen des Musters kann direkt erfolgen oder langsam ein- oder ausblenden. Zusätzlich gibt es auch eine Zeitachse, über welche die verschiedenen haptischen Eindrücke noch einmal zeitlich eingeordnet werden oder verschiedene Muster übereinander spielen können. Nach der Erstellung können diese Pattern über das Nutzerprofil der spezifischen Anwendung zugeordnet werden, wodurch es möglich wird, diese dann auch in der Anwendung frei zu nutzen. Für die Anwendung wurden eigene Muster erstellt, die unterschiedliche Bereiche des Oberkörpers ansprechen und verschiedene Vibrationsstärken verwenden, um eine Unterscheidbarkeit zu ermöglichen.

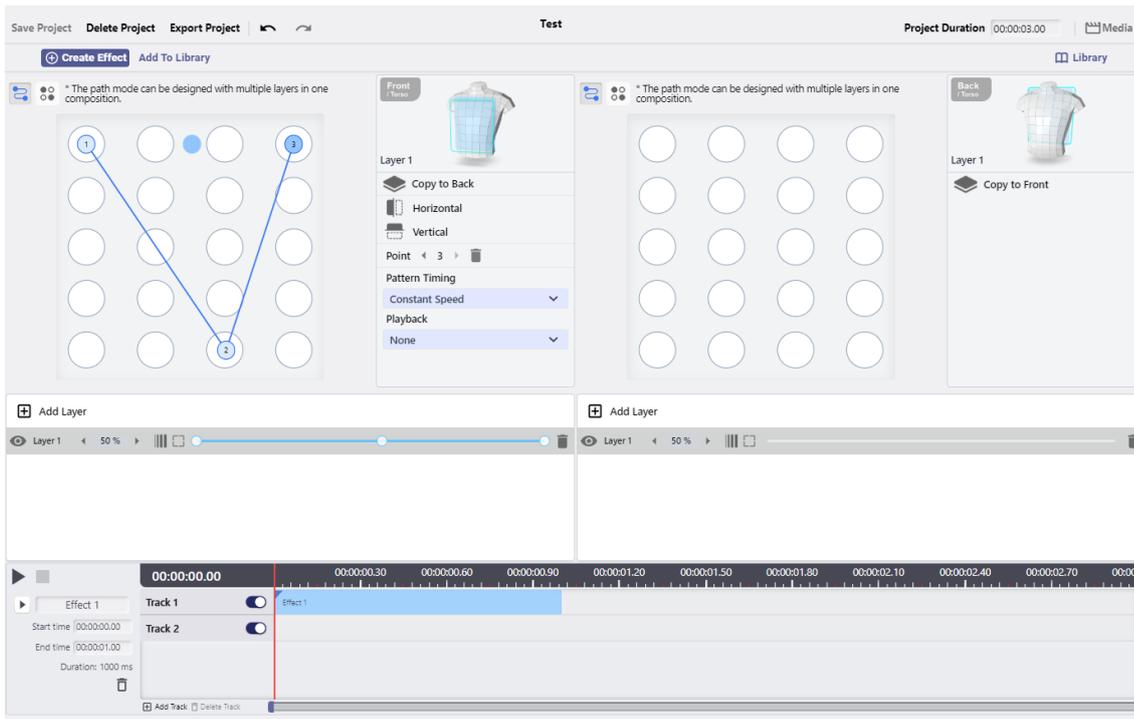


Abbildung 22: Web-Applikation von *bHaptics* zur Erstellung von haptischen Materialien

Verknüpfung der haptischen Materialien mit den Kartenmotiven

Da die erstellten haptischen Materialien nicht lokal im Programm vorliegen, müssen sie über ihren Namen angesprochen werden, um sie anschließend mit den Kartenmotiven zu nutzen. Es ist wichtig, dass beide Karten eines Paares das gleiche haptische Feedback wiedergeben, sodass entschieden wurde, die Karten eines entsprechenden Paares mit einem gleichen Identifikator (ID) zu belegen. Dazu wurde ein neues Skript konzipiert, welches die ID als Zahlenwert festhält. Der Wert wurde über das Erstellen der Kartenpaare hoch iteriert, sodass das erste Kartenpaar die ID „1“ besitzt und das sechste Kartenpaar die ID „6“.

Um nun die haptischen Materialien zu laden, wurde ihr Name entsprechend angepasst. Da ein Materialname aus mindestens fünf Zeichen bestehen muss, wurde eine einheitliche Zeichenkette der Länge vier an den Anfang gesetzt, gefolgt von der entsprechenden Identifikationsnummer. So setzt sich der Name wie folgt zusammen: „aaaa + ID“. An der Stelle im Code, in welcher die Karte vom Nutzer umgedreht wird, wird dann aus der ID der aktuell angesprochenen Karte und der Zeichenkette ein Name generiert. Stimmt dieser mit einem Materialnamen überein, wird das Material über den Befehl `BhapticsLibrary.Play(aaaa+ID)`; abgespielt und es kommt zum haptischen Eindruck.

Spotify

In den ersten Nutzbarkeitsstudien der originalen Anwendung stellte sich das Mitbringen von eigenen Musikdateien für viele Probanden als schwierig heraus. Ältere Personen nutzen CDs oder Schallplatten, wohin gegen die jüngeren Personen auf Musikstreaming setzten und somit keine lokalen Musikdateien zur Verfügung hatten. Da die Musik jedoch ein wichtiger Aspekt der Anwendung ist, wurde neben der Integration der haptischen Weste an einer Anbindung an die bekannte Musikstreaming-Anwendung *Spotify* [298] gearbeitet. Um die Integration nicht vollständig neu programmieren zu müssen, wurde das Asset *MySoundtrack* [56] von Danielfib als Vorlage genommen und entsprechend an das VR-Memory angepasst. Demnach wird eine URL oder URI mit der gewünschten Playlist aus Spotify dem Programm übergeben, welches alle Lieder in eine Liste speichert und jedem Lied eine ID zuweist. Sollte eine Karte mit entsprechender ID aufgedeckt werden, wird passend über die Spotify-Anwendung dann das entsprechende Lied abgespielt. Das ermöglicht einen Zugriff auf eine Vielzahl an Musik, die in individuellen Playlists für jeden Probanden hinterlegt werden können.

Anpassen des Optionsmenüs

Nachdem die *Spotify*-Anbindung und die Integration des TactSuit X40 umgesetzt waren, wurde entschieden, diese neuen Optionen im Optionsmenü frei wählbar zu gestalten. Dies fördert den Grundgedanken der Individualisierung und ermöglicht es, die Anwendung auch ohne die neu entwickelten Optionen zu nutzen. So wurde im Optionsmenü eine Checkbox für *Spotify* angelegt, worunter zwei Textfelder hinterlegt wurden, in welche die gewünschte *Spotify*-Playlist als URI oder URL hinterlegt werden kann. Daneben wurde eine Checkbox für die Weste erstellt, mit dem Text „BHAPTICS“ über die geregelt wird, ob die Weste und somit die Haptik verwendet werden soll oder nicht. Zusätzlich wurden noch zwei weitere Optionen ergänzt: „Bilder aus“ und „Musik aus“. Um nicht nur den Eindruck der haptischen Weste an- und ausschalten zu können, wurde für jeden Wahrnehmungskanal diese Option integriert. So wird bei der Option „Musik aus“ die Methode, welche die Musik den Karten zuweist, nicht verwendet. Die Option „Bilder aus“ lädt zwar die Bilder als Referenz in die Anwendung, jedoch bleiben die Karten beim Spielen untexturiert und demnach weiß.

Diese zusätzlichen Optionen wurden in Abbildung 23 lila umrandet. Sie ermöglichen eine noch bessere Individualisierung und zusätzlich die Möglichkeit für spätere Studien, die Wahrnehmungskanäle separat zu betrachten oder sie in unterschiedlichen Kombinationen zu nutzen.



Abbildung 23: Optionsfenster der Memory-Anwendung

8.5 Studiendesign

8.5.1 Studienaufbau

Um nun die Auswirkungen von Haptik innerhalb dieser bestehenden therapeutischen Anwendung zu erforschen, wurde entschieden, verschiedene Durchläufe des Gedächtnistrainings von den Probanden absolvieren zu lassen. Hierzu wurden insgesamt drei verschiedene Abläufe ausgearbeitet:

1. Visuell und Auditiv (V,A): Ein Durchlauf soll die originale Anwendung ohne haptisches Feedback testen. Die Probanden sollen ein Gefühl für die originale Anwendung bekommen und können von den neuen Features wie der *Spotify*-Anbindung profitieren.
2. Visuell, Auditiv und Haptik (V,A,H): Ein Durchlauf soll das volle Potenzial der Anwendung abbilden. Hierzu werden die persönlichen Bilder, Musik und die generierten haptischen Muster verwendet, die dazu genutzt werden können, den Inhalt und die Position der Karte einzuprägen.
3. Auditiv und Haptik (A,H): Ein dritter Durchlauf soll das Gedächtnistraining nur durch die Musik und die Haptik ohne den visuellen Eindruck trainieren. Traditionelles Memory legt den Fokus auf den visuellen Eindruck. Dies soll den Probanden die Möglichkeit geben, herauszufinden, wie gut sie auch ohne den visuellen Wahrnehmungskanal die Aufgabe lösen können.

8.5.2 Art der Erhebung

Nachdem die einzelnen Testszenarien festgelegt wurden, wurde zur Erhebung der Eindrücke der Probanden ein Fragebogen konzipiert, der sich auf die Anwendung, die Faktoren der Immersion und Präsenz sowie die haptischen Eindrücke konzentriert. Hierzu wurden einige standardisierte Fragebögen verwendet. Für die Erhebung der Immersion und Präsenz, von der Lernanwendungen profitieren können, wurden der „Presence Questionnaire (IPQ)“ von *igroup* [138] sowie der „Presence Questionnaire nach Stems (Version 2.0)“ von Witmer und Singer [378] verwendet. Für die Erhebung des haptischen Eindrucks wurde die acht Fragen aus dem Fragebogen von Cappello et al. [37] verwendet. Neben diesen bestehenden Fragebögen wurden noch zusätzliche Fragen konzipiert. Der erste Teil der Befragung beschäftigt sich mit dem Technikhintergrund der Probanden. Hierbei stehen ihre Erfahrungen mit Technik, insbesondere mit Virtual Reality im Fokus, aber auch die Nutzung von anderen technischen Geräten, wie dem Smartphone und dem PC. So soll festgestellt werden, wie viel Erfahrung die einzelnen Probanden mitbringen, da nach Gracia et al. [102] Fachleute höherwertige Stimuli für ein Gefühl von Realismus benötigen.

Der letzte Teil der Fragen befasst sich mit der Anwendung selbst. Die Individualisierungsmöglichkeiten und ihre Wirkung auf die Probanden soll ebenfalls erhoben werden. Je nach Szenario werden Fragen zu den einzelnen Wahrnehmungskanälen gestellt, um einen Eindruck über diese zu gewinnen. So können ebenfalls zusätzliche Informationen über die Haptik eingeholt werden, die möglicherweise nicht in den bereits angesprochenen Fragebögen berücksichtigt werden oder auf das Szenario abgestimmt sind. Es wurde darauf geachtet, die Formulierungen positiv wie negativ zu formulieren, um möglichen Antworttendenzen vorzubeugen und eine ausgewogenere Einschätzung der Befragten in Bezug auf das Thema zu erhalten.

Alle hier genannten Fragebögen wurden mit einer Likert-Skala von -3 bis 3, dementsprechend sieben Einträgen erhoben, wobei 3 die höchste Zustimmung und -3 die geringste Zustimmung ist, die von den Probanden basierend auf den Fragen abgegeben werden kann.

8.5.3 Ablauf der Studie

Um keine Reihenfolgeeffekte zu kreieren, wurden die drei unterschiedlichen Szenarien in einer pseudo-randomisierten Ordnung nacheinander von den Probanden abgeprüft. So konnten alle möglichen Reihenfolgekombinationen durchgeführt werden.

Zu Beginn der Studie wurde ein persönlicher Bildordner erstellt oder einer der vorgefertigten Ordner verwendet. Hierfür wurden drei Bildordner vorbereitet: Bilder von Tieren, Naturbilder und Bilder von Sehenswürdigkeiten. Diese Option wurde geboten, sofern die Probanden keine eigenen Bilder mitbringen konnten oder wollten, um dennoch die Anwendung nutzen zu können. Anschließend wurde gemeinsam mit dem Probanden eine Playlist mit der gewünschten Musik innerhalb von *Spotify* erstellt. Hierbei wurden die Präferenzen der Nutzer in den Vordergrund gestellt, um den Individualisierungsfaktor hervorzuheben.

Entsprechend der zuvor bestimmten Reihenfolge starteten die Probanden mit dem ersten, ihnen zugewiesenen Szenario auf Level 1. Entsprechend ihrer individuellen Wünsche wurde eine Umgebung gewählt, die Zeitanzeige an bzw. abgeschaltet sowie der angegebenen Bildordner und die Musikplaylist hinterlegt. Dies wurde innerhalb eines Profils abgespeichert, wodurch die Einstellungen auch für die nächsten Durchläufe übernommen werden konnten. Anschließend wurde mit dem Gedächtnistraining begonnen. Hierbei ändert sich nichts zu dem in Abschnitt 8.3.1 angegebenen Ablauf. Nach Beendigung wurde dann der entsprechende Fragebogen von den Probanden ausgefüllt. Je nach den aktiven Wahrnehmungskanälen waren die Fragebögen angepasst. Gibt es keine Haptik in dem aktiven Durchlauf, gibt es keine Fragen zu dieser.

Anschließend folgten die zwei weiteren Durchläufe. Zwischen den einzelnen Szenarien konnten die Individualisierungsoptionen angepasst werden. Darunter die Musik, die Bilder und auch die VR-Umgebung. Diese Option wurde dann in den verschiedenen Durchläufen mit erfasst, können aber auch über die vom Programm ausgeschriebenen Daten nachvollzogen werden. Hierbei gibt das Programm Informationen passend zum Profil aus, die auch unabhängig von dem Fragebogen eingesehen werden können.

8.6 Ergebnisse

Die angesetzte Studie, die auf dem zuvor genannten Konzept basiert, wurde von insgesamt zehn Personen (6 weiblich/ 4 männlich) abgeschlossen. Die jüngste Person war 16, die älteste 40 Jahre alt. Das Durchschnittsalter betrug 27,8 Jahre. Die zehn getesteten Probanden brachten alle ein gewisses Technikverständnis mit (2,14). So verbringen fast alle Teilnehmer (9/10) mehr als eine Stunde pro Tag am Computer oder Laptop. 50% nutzen das Smartphone zwischen einer bis drei Stunden pro Tag und die anderen 50% der Befragten sogar länger. Die Hälfte der Teilnehmer spielen kaum bis gar keine Videospiele, 40% pro Tag ca. eine bis drei Stunden und eine Person sogar acht bis zehn Stunden pro Tag. Auch die Erfahrungen mit der virtuellen Realität waren recht unterschiedlich (0,57). So hatten vier der zehn Teilnehmer kaum Erfahrungen mit der Technik, wobei die anderen sechs Personen durchaus gewisse Erfahrungen bereits gesammelt hatten. Dennoch nutzen 6/10 die VR weniger als einmal im halben Jahr. Nur eine Person gab an, die virtuelle Umgebung mehrmals pro Woche zu nutzen.

Aufgrund der kleinen Probandenzahl wurde nach Betrachtung der Werte entschieden, den empirischen Mittelwert und den Median für die Auswertung zu nutzen. Durch mögliche technische Probleme oder Einzelfälle während der Studie, die das allgemeine Ergebnis stark verzerren könnten, wird der Median betrachtet, der jedoch immer in Relation mit dem Mittelwert gestellt wird.

Immersion und Präsenz nach *igroup*

Da die Präsenz ein wichtiger Faktor bei der Betrachtung der Haupthypothese darstellt, wurde dieser Aspekten mit zwei unterschiedlichen Fragebögen evaluiert. Der Fragebogen von *igroup* erfasst die allgemeine und räumliche Präsenz sowie die Involviertheit der Probanden und den Realismus der Anwendung (siehe Tabelle 1).

Kategorie	Generelle Präsenz	Räumliche Präsenz	Involviertheit	Realismus
V,A	2 (2)	2,3 (2,5)	0,7 (0,75)	1,3 (1,5)
A,H	1,5 (2)	1,62 (1,8)	0,625 (0,875)	0,575 (1,125)
V,A,H	2,1 (2)	2,16 (2,7)	0,95 (1,5)	1,025 (1,125)

Tabelle 1: Mittelwert und (Median) der Kategorien nach *igroup*

Die generelle Präsenz wurde entsprechend des Medians gleich bewertet. Da sich weder der Szenenaufbau noch die Aufgabe ändert, scheint die Haptik keinen großen Einfluss auf diesen Faktor zu nehmen.

Die Bewertung der räumlichen Präsenz dagegen zeigt, dass der visuelle Eindruck der Bildmotive einen großen Einfluss nimmt. So wurde der Wert ohne visuellen Eindruck mit nur 1,8 bewertet, während die Szenen mit visuellem Feedback mit 2,5 und 2,7 um fast einen ganzen Punkt besser bewertet wurden. Auch hier scheint es sinnvoll zu sein, den Median zu betrachten, da insbesondere die Frage „Ich hatte das Gefühl, nur Bilder zu sehen.“ möglicherweise auf das Memory und weniger auf die Performance der virtuellen Welt bezogen wurde, wodurch es dort zu Ausreißern kam. Ob sich die Weste jedoch positiv auf die räumliche Präsenz auswirkt, ist den Werten nicht direkt zu entnehmen. So scheint nach der Betrachtung des Mittelwerts die originale Anwendung etwas besser abzuschneiden (V,A: 2,3 V,A,H:2,16), bei der Betrachtung des Median überwiegt die räumliche Präsenz in der Anwendung mit allen Wahrnehmungskanälen (V,A:2,5 V,A,H:2,7).

Auf welchen Faktor die Haptik jedoch deutlich mehr Einfluss zu nehmen scheint, ist der Faktor der Involviertheit. Hier erzielt die Anwendung (V,A,H), die alle Wahrnehmungskanäle berücksichtigt, den höchsten Wert (1,5) und scheint die originale Anwendung (0,75) zu bereichern. Diese Tendenz lässt sich auch aus der Anwendung ohne Bildmotive erkennen. Auch hier wird ein etwas höherer Wert (0,875) erreicht, obwohl der wichtige visuelle Eindruck fehlt.

Dafür scheint der haptische Eindruck durch den TactSuit X40 nicht besonderes realistisch und wirkt sich sogar negativ auf die Präsenz aus. Da sich die Realismuswertung im *igroup* Fragebogen aus dem Vergleich der Erfahrungen aus der Realität ergibt, kann auch die insgesamt etwas niedrigere Bewertung erklärt werden. Das konzipierte Memory ist in dieser dargestellten Form nicht in die Realität übertragbar, wodurch die Umsetzung in der virtuellen Realität bestärkt wird, es jedoch für die Nutzer nur schwer mit bereits gemachten Erfahrungen verglichen werden kann.

Insgesamt scheint nach dem Fragebogen von *igroup* der visuelle Eindruck der Karten eine besondere Rolle für die Anwendung zu spielen. So schneidet die Anwendung ohne visuellen Eindruck schlechter ab, als die Vergleichsanwendungen. Die haptische Weste verstärkt die Involviertheit der Nutzer, senkt dafür aber die Realismuswertung. Dennoch sind alle Werte in einem guten oberen Bereich der Werteskala eingestuft, was für eine allgemein gute Bewertung der Anwendung spricht.

Immersion und Präsenz nach Stems (Version 2)

Die Auswertung des Stems (Version 2) wurde zum Vergleich und der Ergänzung des Fragebogens nach *igroup* genutzt und konzentriert sich auf die vier Hauptfaktoren: Kontrollfaktoren, sensorische Faktoren, Ablenkungsfaktoren und die Realismusfaktoren. Die Ergebnisse können in der folgenden Tabelle 2 im Detail nachgeschlagen werden:

Kategorie	Controll	Sensory	Distraction	Realism	Involvement	Natural	Auditory	Haptics	Resolution	Interface Quality
V,A	2,05 (2,38)	2,07 (2,5)	-1,53 (-1,92)	2,03 (2,57)	2,39 (2,63)	1,63 (1,83)	2,1 (2,83)	1,6 (2)	2,2 (2,75)	2,4 (2,83)
A,H	1,99 (2,42)	1,7 (2,05)	-1,45 (-2,08)	1,67 (2,14)	2,14 (2,5)	1,73 (2)	1,8 (2,33)	1,1 (1,5)	1,95 (2,25)	2,1 (3)
V,A,H	1,92 (2,23)	2,05 (2,27)	-1,52 (-1,58)	1,89 (2,29)	2,28 (2,54)	1,27 (1,67)	2,17 (2,33)	1,35 (1,75)	1,9 (2)	2,5 (2,67)

Tabelle 2: Mittelwert und (Median) nach den Kriterien von Stems (Version2)

Die Bewertungen der Kontrollfaktoren liegen hier sehr nahe beieinander. Hier scheint es keinen messbaren Unterschied zwischen den einzelnen Szenarien zu geben. Anders sieht es bei den sensorischen Faktoren aus. Hier schneidet die Anwendung ohne Bildmotive deutlich schlechter ab als die Vergleichsanwendungen. Fragen, die sich auf den Sehsinn oder das Durchsuchen der virtuellen Welt beziehen, wurden deutlich schlechter bewertet als in den Vergleichsszenarien, wobei das Szenario mit allen Wahrnehmungskanälen hier deutlich besser abschneidet (Median V,A:2 V,A,H:2,5). Das Nicht einbeziehen des visuellen Kanals scheint sich, wie bei *igroup* gemessen, nachteilig auf die Aspekte der sensorischen Bewertung auszuwirken. Die originale Anwendung wurde dennoch insgesamt, bezogen auf die sensorischen Eindrücke, minimal besser bewertet als die Szene mit allen Wahrnehmungskanälen, wobei dieser Unterschied sehr gering ist. Auch wenn die Nutzer angaben, dass alle ihre Sinne durch die Szene (V,A,H) stärker angesprochen waren und sie das Gefühl hatten, die virtuelle Welt besser untersuchen zu können, wurde der auditive Eindruck in der originalen Szene deutlich besser wahrgenommen. Dies könnte mit den hörbaren Vibrationsmotoren der Weste zu tun haben, die möglicherweise mit der Musik konkurrieren und somit die Lokalisierung von Geräuschen erschwert haben, was sich nachteilig auf die Bewertung ausgewirkt hat.

Die Mechanismen der Ablenkung wurden sehr individuell eingestuft. Hier gibt es einen klaren Unterschied zwischen der Durchschnittswertung und dem Median. So konzentrierten sich durchschnittlich mehr Teilnehmer auf die Mechaniken der Weste und den auditiven Eindruck in (A,H), wobei in der Gesamtbetrachtung die Kontroll- und Anzeigeräte in der Szene (V,A,H) deutlich stärker wahrgenommen worden sind und somit die Szene (A,H) den anderen Szenarien überlegen scheint. Da mehr Kontrollgeräte bei dem (V,A,H)-Szenario genutzt werden, könnte diese Wertung erklärt werden. Dies könnte

auch auf eine mögliche Überforderung der Nutzer hinweisen.

Die Bewertung des Realismus stimmt mit den Ergebnissen von *igroup* überein. Auch hier kann die originale Anwendung eine bessere Wertung erreichen, als die mit Haptik modifizierten Szenen. Trotz des fehlenden haptischen Eindrucks hatten die Probanden eher das Gefühl, die virtuelle Umgebung durch Berührung aktiv erkunden zu können. Möglicherweise kann dies dadurch erklären, dass die haptischen Muster keine direkte Reaktion der physischen Interaktion mit der virtuellen Welt darstellt, sondern davon abgekapselt wirken. Dementsprechend ist sie nicht realistisch und verfälscht den Eindruck nachteilig.

Neben den Hauptfaktoren gibt es eine zusätzliche Unterskala, die sechs weitere Aspekte der Präsenz beleuchtet. Die Involviertheit der Probanden in den Szenen wurden sehr ähnlich bewertet, wobei hier die originale Anwendung im Gegensatz zu den Ergebnissen nach *igroup* minimal besser bewertet ist. Obwohl die Personen das Gefühl hatten, nicht so stark durch die Wahrnehmungskanäle eingebunden worden zu sein, fühlten sie sich ohne die Haptik insgesamt sicherer. Möglicherweise, da sie das Gefühl hatten, die Ergebnisse besser steuern und einschätzen zu können, als wenn alle Wahrnehmungskanäle gleichzeitig angesprochen wurden.

Die Bewegungen fühlten sich nach den Nutzern in der Szene ohne visuellen Eindruck natürlicher an. Durch das Wegbleiben des visuellen Eindrucks könnte es sein, dass sich die Nutzer besser auf den Faktor konzentrieren konnten. Insbesondere die Szene (V,A,H) konnte am hier wenigsten mit realen Erfahrungen verglichen werden, weshalb der Wert für die Natürlichkeit hier etwas unter den Bewertungen der anderen Szenen liegt.

Wie bereits angesprochen, konnte der Audioeindruck in der originalen Szene besser wahrgenommen werden. Dies könnte auf die haptische Technik zurückgeführt werden, da die hörbare Motorik womöglich den auditiven Eindruck gestört hat.

Der haptische Eindruck wurde ebenfalls bei der originalen Szene besser bewertet, als bei den modifizierten Szenen. Da die Haptik der Weste keinen direkten Einfluss auf die physische Interaktion nimmt, erhöht sie nicht die physische Wirkung der virtuellen Welt, sondern scheint eher nachteilig für diesen Eindruck zu sein.

Das spiegelt sich auch in der Wertung der Auflösung (Resolution) wider. Dieser Aspekt adressiert das Untersuchen von und Interagieren mit Objekten. Da hier die Haptik nicht direkt auf virtuelle Objekte reagiert und die Vibrationen auch nicht auf die Inhalte der Karten abgestimmt sind, scheint es nachteilig zu wirken. So liegt die Bewertung der mit Haptik modifizierten Anwendungen unter der, der originalen Anwendung.

Die Qualität der Szenen wurde durch das HMD ebenfalls unterschiedlich wahrgenommen. Da weder an der Technik noch an der Brille etwas während der Studien verändert wurde, könnte dies entweder durch die verschiedenen virtuellen Umgebungen erklärt werden, die möglicherweise nicht gleichermaßen optimiert wurden, oder an Trackingproblemen. Aber auch die Haptik könnte hier Einfluss nehmen, da die Technik deutlich stärker wahrgenommen wurde, als die Controller alleine.

Zusammengefasst scheint nach dem Fragebogen nach Stems (Version 2) die Immersion nur in wenigen Aspekten positiv von der Haptik beeinflusst zu werden. So fühlen sich zwar die Personen durch die größere Anzahl an Wahrnehmungskanälen mit der Weste mehr eingebunden und konnten auch mehr innerhalb der Anwendung lernen, jedoch scheint insbesondere der auditive Kanal durch die Weste negativ beeinflusst zu werden. Ob dies nun durch die Lautstärke der Motoren oder der Überreizung durch die verschiedenen Wahrnehmungskanäle hervorgerufen wurde, ist aus den Ergebnissen nicht herauszulesen. Ohne die Weste können die Personen die Reaktionen in der virtuellen Welt besser abschätzen und bekamen ein besseres Gefühl für die virtuellen Objekte in ihrer Umgebung. Dennoch sind insgesamt die Präsenzwertungen für alle Szenarien recht hoch, was dafür spricht, dass die Szenen allgemein bereits gut für die Immersion optimiert sind.

Bewertung der Haptik nach Cappello et al.

Die Fragen zur haptischen Technologie, welche durch den Fragebogen von Cappello et al. erhoben wurden, richteten sich nur an die Szenarien mit Haptik (A,H und V,A,H). Hierbei waren die Eindrücke zur haptischen Technologie in beiden Szenarien sehr ähnlich, wie in der folgenden Tabelle 3 abzulesen ist:

Frage:	(A,H)	(V,A,H)
1. Wie gut konnten Sie sich auf das haptische Feedback verlassen?	1,8 (2)	1,7 (2)
2. Wie gut konnten Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?	1 (2)	2,9 (3)
3. Wie realistisch war das haptische Feedback?	1,1 (1,5)	1 (1,5)
4. Wie sehr haben das haptische und visuelle Feedback übereingestimmt?	1,4 (2)	1,4 (2)
5. Wie gut konnte das haptische Gerät gesteuert werden?	1,3 (1)	1,1 (1)
6. Wie gut empfanden Sie die Erfahrung insgesamt?	2,2 (2)	2,6 (3)
7. Wie sicher fühlten sie sich mit dem haptischen Feedback ?	1,6 (1)	1,4 (1,5)
8. Wie gut konnten Sie die gestellte Aufgabe erfüllen?	2,3 (2)	2,7 (3)

Tabelle 3: Mittelwert und (Median) nach Cappello et al.

Die Verlässlichkeit des visuellen Eindrucks wurde in der Szene mit allen Wahrnehmungskanälen sehr hoch mit einer 2,9 (3) bewertet. Dieser Wert war bei dem Fehlen des visuellen Eindrucks mit einer 1 (2) deutlich geringer, was sich durch das Fehlen der Kartenmotive in (A,H) erklären lässt. Anzunehmen ist, dass sich dies auch auf den Gesamteindruck widerspiegelt hat, weshalb auch insgesamt die Szene (V,A,H) hinsichtlich der gesamten Erfahrung und dem Bewältigen der Aufgabe besser abschneidet. Jedoch fühlten sich die Personen mit dem haptischen Feedback je nach betrachteten Wert in unterschiedlichen Szenen sicherer. Woher dieser Unterschied kommt, lässt sich nicht ganz erklären. Möglicherweise hängt dies mit den Aspekten der Individualisierung und den entsprechenden Lerntypen der Nutzer zusammen. Dies könnte durch eine separate Betrachtung der Wahrnehmungskanäle oder durch die Verwendung individueller haptischer Muster herausgefunden werden.

Bewertung durch eigene Fragen

Abschließend wurden noch eigene Fragen gestellt, die sich primär auf die Individualisierungsoptionen und auf die verschiedenen Wahrnehmungskanäle konzentriert haben. Diese können in Tabelle 4 nachgelesen werden. Da nicht alle Wahrnehmungskanäle in allen Szenen berücksichtigt wurden, wurden die Fragen im jeweiligen Fragebogen weggelassen.

Fragen:	V,A	A,H	V,A,H
1. Ich hatte das Gefühl mich individuell bei den Optionen entscheiden zu können.	2,1 (3)	2,7 (3)	2,8 (3)
2. Die virtuelle Umgebung hat mich meine eigentliche Aufgabe vergessen lassen	-1,6 (-2)	-0,7 (-1,5)	-1,1 (-1)
3. Die Steuerung hat gut funktioniert.	2,7 (3)	2,8 (3)	2,6 (3)
4. Die Bilder haben mir geholfen die Position der Karten einzuprägen.	2,9 (3)	-	2,8 (3)
5. Die Auswahl der Musik hat mich eingegrenzt.	-2,7 (-3)	-2,4 (-3)	-2,8 (-3)
6. Die Musik hat mir dabei geholfen, mir die Positionen der Karten zu merken.	1,8 (3)	2 (3)	1,7 (3)
7. Die haptische Weste war angenehm zu tragen.	-	2,8 (3)	2,3 (3)
8. Die haptische Weste war sehr schwer.	-	-2,5 (-3)	-2,6 (-3)
9. Die haptische Weste hat meine Bewegungen eingeschränkt.	-	-2,7 (-3)	-2,5 (-2)
10. Die Vibrationen waren angenehm stark.	-	2,3 (2,5)	1,9 (3)
11. Die Vibrationsmuster waren gut auseinander zu halten.	-	1,1 (1)	0,3 (-0,5)
12. Die Vibrationen haben mir geholfen die Position der Karten zu merken.	-	0,5 (1)	0.1 (0)
13. Die Vibrationsmuster waren zu ähnlich.	-	-0,9 (-1)	-0,5 (-0,5)

Tabelle 4: Mittelwert und Median eigener Fragen

Zu Beginn des Fragebogens stand der insgesamt Eindruck zu den Individualisierungsoptionen im Fokus. Diese wurden bei allen Szenen gleich gut bewertet, wobei ein kleiner Teil der Befragten die haptischen Szenen individueller empfanden.

Dafür schien die originale Szene den Fokus weniger von der Aufgabe weg zu lenken (-2), als die anderen Szenarien. Die Weste scheint hier den Fokus stärker abzulenken als die Bildmotive (-1,5), wobei die Gesamtheit aller Reize zur größten Ablenkung führt (-1). Dennoch schien die Steuerung der Anwendung bei allen Teilnehmern und Szenen sehr gut funktioniert zu haben (3).

Die Bildmotive, die nach den Präsenzfragebögen und Cappello et al. bereits als wichtiger Bestandteil der Anwendung evaluiert werden konnte, wurde auch beim Merkprozess mit der maximalen Wertung (3) versehen. Aber auch die Musik bekam die gleiche Wertung (3), wobei die Spotifyanbindung zu weniger Einschränkungen bei der Auswahl geführt hat und somit als sinnvolle Ergänzung zur Individualisierung der Szene beiträgt.

Abschließend wurde auch die Weste evaluiert. Diese kann mit ihrem Komfort überzeugen und schränkt die Personen wenig in der Bewegung ein. Die Bewertung des vibrotaktilen Feedbacks wurde in den Szenen unterschiedlich gut wahrgenommen, lässt sich aber auch

hier durch Aspekte wie die Individualisierung und möglicherweise fehlende Passung zum visuellen Reiz erklären. Jedoch zeigt sich, dass insbesondere an den haptischen Mustern gearbeitet werden muss. So konnten viele die Muster nicht ausreichend gut auseinanderhalten und konnten eher davon profitieren, wenn der visuelle Reiz nicht gegeben war.

Vervollständigt wurden die Fragen zu den Wahrnehmungskanälen über ein Ranking. Hieraus ergab sich die folgende Reihenfolge bei Betrachtung aller Probanden:

1. Bilder
2. Musik
3. Haptik

Die Reihenfolge war sehr eindeutig und belegt noch einmal die Annahme, dass der visuelle Eindruck am besten beim Merken der Karten und Positionen unterstützen konnte. Auf Platz zwei kam die Musik, welche jedoch nicht ganz einstimmig auf diese Position gewählt wurde. Hier gab es einen Probanden, welcher die Haptik hilfreicher empfand. Zwar erreicht die Haptik beim Ranking den letzten Platz, jedoch wurde zum Erfassen ihres Eindrucks ein zusätzliches Freitextfeld ergänzt, in welchem die Teilnehmer ihre Meinung niederschreiben konnten. Die Meinungen gegenüber der Weste fallen dabei sehr positiv aus. So geben die meisten Teilnehmer an, dass sie die Weste als hilfreich wahrgenommen haben und diese ihnen half, die Position zu merken. Zwei Teilnehmer gaben an, keine signifikante Verbesserung durch die haptische Weste gemerkt zu haben, lehnen diese Technologie jedoch nicht ab. Alle Durchläufe sind erfolgreich absolviert worden und alle Teilnehmer gaben an, dass sie diese Anwendung erneut nutzen würden.

8.6.1 Zusammenfassung

Nach der Auswertung der unterschiedlichen Fragebögen, welche die Anwendung und die Integration der Haptik aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet hat, ergeben sich zusammenfassend folgende Ergebnisse:

Die Bildmotive, die das Memory als Gedächtnistraining auszeichnen, wurden von den Probanden als hilfreichster Aspekt beim Merken der Kartenpaare und Positionen bewertet. Im Ranking erhielt der visuelle Eindruck ausnahmslos den ersten Platz. Dieser Eindruck deckt sich mit den Ergebnissen aus den anderen Fragebögen. Auch hier spielt der visuelle Eindruck in der Bewertung eine große Rolle. So gaben die Probanden an, die Aufgabe mit Bildern deutlich besser bewältigen zu können. Auch die Immersion und Präsenz profitiert von den texturierten Karten. Die Anwendung ohne Bildermotive wurde demnach hinsichtlich der Präsenz etwas schlechter bewertet als die Vergleichsszenarien. Da das auditive Feedback in allen Szenarien genutzt wurde, kann hierbei kein direkter Vergleich mit einem anderen Szenario getroffen werden. Jedoch zeichnet sich in der Befragung ab, dass die Musik als hilfreiche Ergänzung angesehen wurde und erhielt von den meisten Probanden den zweiten Platz beim direkten Ranking. Vor allem die *Spotify*-Integration ermöglicht eine flexible Individualisierung der Anwendung. Jedoch schien der auditive Eindruck in der originalen Szene besser wahrgenommen worden zu sein, als in den modifizierten Szenarien.

Die haptische Integration ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung. Die Annahme, dass Haptik die Präsenz per se positiv beeinflusst, konnte durch diese Studie widerlegt werden. So sind einige Aspekte der Immersion und Präsenz schlechter bewertet worden als bei der originalen Anwendung ohne die haptische Integration. Dies bezieht sich insbesondere auf die Aspekte des Realismus und der sensorischen Eindrücke. Eine Erklärung hierfür könnte die haptische Integration selbst sein. Die Vibrationen sind eher willkürlich und die Muster nicht auf die Probanden, Kartenmotive oder Umgebung abgestimmt. Das zeigt auch die Aussage eines Probanden: *„Die Vibrationen [...] passten meines Erachtens nicht zum Bild. Die sehr starken Vibrationen, wie beim Hai oder auch bei der Katze haben mir ein Gefühl von „Ich habe etwas falsch gemacht“ vermittelt. Mir gefielen die leichteren Vibrationen besser. Jedoch können diese Schwächen angegangen werden.“* Diese Aussagen und auch die Ergebnisse der Fragebögen lassen darauf schließen, dass die Haptik nicht zu den Erwartungen der Probanden passte und somit nicht dabei unterstützen konnte, die virtuelle Welt detaillierter wahrzunehmen. Der auditive Eindruck schien durch die

haptische Weste schlechter wahrgenommen werden zu können. Möglicherweise ist dies auf die hörbaren Vibrationsmotoren zurückzuführen, die das Hören der Geräusche der virtuellen Welt erschweren.

Das subjektive Ranking ergab ebenfalls, dass die Haptik dem visuellen und auditiven Eindruck in diesem Szenario unterlag. Nur eine Person gab an, das haptische Feedback hilfreicher zu empfinden als den auditiven Eindruck. Dennoch haben die Probanden die Haptik insgesamt als hilfreich gewertet. Der Grad dieser Unterstützung variiert jedoch deutlich zwischen den Probanden. So haben die Nutzer sehr unterschiedlich auf die vorgefertigten Vibrationsmuster reagiert und sich teils andere Vibrationsmuster, Vibrationsstärken und Körperbereiche gewünscht, auf welche die Haptik einwirkt. Das eröffnet die Theorie, dass neben der Musik und den Bildern auch die Haptik individualisiert werden müsste, um die Motive und Positionen besser einprägen zu können. Einen weiteren Hinweis für diese sehr unterschiedlichen Meinungen könnte das Lernmodell nach Vester geben, wonach jeder Mensch die Wahrnehmungskanäle individuell stark nutzt. Dementsprechend können nicht alle Menschen gleich gut von der haptischen Ergänzung profitieren. Ein letzter Aspekt, der diese Wertung ebenfalls beeinflussen könnte, ist die Gewöhnung. Sich auf den visuellen und auditiven Eindruck zu verlassen, ist für Menschen deutlich üblicher als auf haptische Impulse, da diese Technik bisher kaum genutzt wird. Durch häufigeres Nutzen der Anwendung würden die Vibrationsmuster bekannter werden, wodurch möglicherweise die Unterscheidbarkeit und Verlässlichkeit für den Anwender steigen könnte. Durch die Berücksichtigung der Individualisierung der Lerntypen nach Vester und der Gewöhnung könnte auch die Präsenz positiv beeinflusst werden.

Insgesamt konnten aber auch Aspekte der Immersion und Präsenz durch die Weste gesteigert werden. Insbesondere die Involviertheit der Nutzer in die virtuelle Szene sticht dabei hervor. So konnten die Nutzer von der zusätzlichen Haptik profitieren, auch wenn die Nutzung aller Wahrnehmungskanäle entsprechend der Ergebnisse möglicherweise auch überfordernd gewirkt haben könnte. Um die Präsenz anderweitig durch die haptische Weste zu optimieren und den Effekt der Überforderung zu mindern, bietet der TactSuit X40 die Möglichkeit, ein haptisches Feedback automatisch aus Musikstücken generieren zu lassen. Das hätte den Vorteil, dass die Vibrationsmuster bereits durch die Musik individualisiert und glaubwürdiger in die virtuelle Welt eingebunden wären. Ebenfalls würden die Vibrationsmotoren im Takt vibrieren, wodurch der auditive Eindruck unterstützt und nicht gestört werden würde. Diese Theorie müsste aber durch weitere Studien untersucht werden.

8.6.2 Fazit

Insgesamt ergeben sich bereits mehrere Forschungstendenzen aus dieser Integration, die in weiteren Studien betrachtet werden müssen.

Die Ergebnisse der Befragungen werfen einige spannende Theorien auf. So scheint die Haptik nicht immer eine Steigerung der Präsenz hervorzurufen. Es konnte in diesem Fall gezeigt werden, dass die Haptik keinen signifikant positiven Einfluss auf die meisten Aspekte der Immersion aufzeigt und sogar zu teils schlechteren Wertungen führt, die wohl auf die Nutzung der haptischen Weste zurückzuführen sind. Auch scheinen gewisse Aspekte bei der Integration berücksichtigt werden zu müssen, um eine Steigerung der Präsenz zu erzeugen. Nicht nur die glaubwürdige Integration der Haptik spielt eine Rolle, sondern auch die individuelle Wahrnehmung des Nutzers. Darüber hinaus scheinen die haptischen Impulse zu den Geschehnissen der virtuellen Welt passen zu müssen, damit die Probanden die haptische Reaktion einschätzen können.

Auch die Wahrnehmung der Geräusche wurde durch die hörbare Motorik möglicherweise negativ beeinflusst. Auch hier muss in weiteren Integrationen darauf geachtet werden, wie sich mögliche technische Umsetzungen auf die anderen Wahrnehmungskanäle auswirken. Dafür scheinen sich die Personen insgesamt deutlich mehr in die virtuelle Interaktion involviert zu fühlen, wovon eine virtuelle Therapieanwendung besonders profitieren kann. Auch gaben die Nutzer an, mit allen Wahrnehmungskanälen mehr gelernt zu haben. Um dies zu prüfen, bedarf es jedoch eine längere Studie, welche die Effekte über einen langen Zeitraum beobachtet. Die Haptik scheint hierbei insbesondere den visuellen Kanal gestärkt zu haben. Jedoch wäre es wichtig, dass die Personen dabei das Gefühl von Kontrolle behalten und die Situation trotz Haptik gleich gut einschätzen können.

Von technischer Seite aus scheint die Integration, Nutzbarkeit und Akzeptanz der Weste auf eine gute Einbindung in den Praxisalltag in der Therapie hinzudeuten. Bei der Integration und Nutzung gab es keine nennenswerten Probleme. Aus Entwicklersicht, aber auch von der Nutzerseite scheint die Weste überzeugen zu können. Die lange Akkulaufzeit, die Möglichkeit, die Weste über der Kleidung zu tragen und die freie Anpassbarkeit an verschiedene Körperformen ermöglichten einen problemlosen Studienablauf und zeigte, dass der haptische Anzug auch von weniger technikaffinen Leuten genutzt werden könnte. Auch die Option, Haptik aus Musik zu generieren, ermöglicht es, schnell und ohne Technikerfahrung die Haptik nutzbar zu machen. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass sich die Anbindungen derzeit noch ändern können, wodurch eine langzeitige Nutzung gewisser Anwendungen nicht gewährleistet werden kann.

9 Konzeption und Implementation einer Anwendung zum Vergleich haptischer Handschuhe

9.1 Einleitung

Durch die Betrachtung der haptischen Bekleidung konnten bereits einige Tendenzen zu haptischer Technologie herausgearbeitet werden, die in den nächsten Schritten weiter untersucht werden müssen. Hierzu wurde, wie im Kapitel 6 Konzeptentwicklung besprochen, zwei unterschiedliche haptische Handschuhepaare angeschafft, die Manus Prime X Haptic VR und die SenseGlove Nova, die im Folgenden noch einmal im Detail vorgestellt werden. Ziel dieses Kapitels ist der Vergleich der beiden haptischen Handschuhe durch eine entsprechende Anwendung, um Antworten auf die Frage zur möglichen Integration und Wirkung der Technik zu bekommen. Anders als bei den haptischen Anzügen sind die ausgewählten haptischen Handschuhe in ihrer Funktionalität sehr ähnlich. Sie decken die gleichen Körperbereiche ab und sollen für eine immersive Interaktion mit der virtuellen Umwelt sorgen. Durch den Vergleich wird erwartet, mögliche Stärken und Schwächen der Technik herausarbeiten zu können, die bei der Integration der Handschuhe in eine therapeutisch sinnvolle VR-Anwendung berücksichtigt werden müssen.

9.2 Manus Prime X Haptic VR

Haptischen Datenhandschuhe bieten eine neue Interaktionsform in der VR. *MANUS* ist eine Firma, die bereits seit längerem mit haptischen Handschuhen auf dem Markt agiert. Bereits im Jahre 2016 [151] kündigten sie ihre ersten VR-Handschuhe an, die über die Jahre hinweg weiter entwickelt wurden. Dadurch konnte die Firma in diesem Bereich bereits viele Erfahrungen sammeln. Dies ist einer der Gründe, weshalb die Entscheidung für eine Anschaffung der Manus Prime X Haptic VR (siehe auch Kapitel 4.4.1) getroffen wurde. Ein weiterer Aspekt war die Verfügbarkeit und der Preis. Viele der im State of the Art vorgestellten Datenhandschuhe waren zur Zeit der Entwicklung noch nicht auf dem Markt verfügbar. So waren die Handschuhmodelle von *MANUS* im Vergleich zu anderen Anbindungen mit ca. 5000 Euro pro Paar erschwinglich und befinden sich preislich eher im Mittelfeld. Durch das geringe Gewicht von nur 70g pro Hand sind sie vergleichsweise leicht, was ebenfalls Vorteile mit sich bringen könnte. Zusätzlich sind sie leicht waschbar und besitzen auswechselbare Akkus zur schnellen Stromversorgung, die eine leichte Handhabung in der Praxis versprechen.

9.3 SenseGlove Nova

Neben den Manus Prime X Haptic VR wurden im Rahmen dieser Arbeit die SenseGlove Nova von *SenseGlove* als haptisches Vergleichspaar angeschafft (siehe auch Kapitel 4.4.1). Anders als die haptischen Handschuhe von *MANUS* setzen diese primär auf Force Feedback, also die haptische Simulation von Objekten und Oberflächen durch interne Motoren, welche auf die Finger einen passenden Widerstand ausüben. Hierbei kann über Schnüre und Motoren eine Kraft von 20 Newton auf jeden Finger ausgenommen den kleinen Finger ausgeübt werden. Dadurch ist eine andere haptische Wahrnehmung als mit Vibrationen möglich, die das Greiferlebnis in der virtuellen Realität stark beeinflussen könnte. Zusätzlich ermöglichen die Datenhandschuhe Vibrationen durch *Voice Coil* Motoren, die nach den Entwicklern Empfindungen wie einen Knopfdruck simulieren können sollen. Der ähnlichen Preisrahmen von ebenfalls knapp 5.000€, aber auch der mögliche Vergleich vom Force Feedback-System zu Vibrationen, haben diese Anschaffung stark beeinflusst. Zusätzlich sind die Handschuhe dehnbar, wodurch die Passgröße etwas variabler ist als bei den Handschuhen von *MANUS*. Jedoch sind sie mit 320g deutlich schwerer und die Reinigung der Handschuhe ist deutlich aufwendiger, da hierfür das Exoskelett aus Schnüren zuvor entfernt werden muss. Ebenfalls besitzen die Handschuhe keinen austauschbaren Akkus, weshalb stetig darauf geachtet werden muss, dass die Handschuhe geladen sind.



Abbildung 24: SenseGlove (links) - Manus Prime X Haptic (rechts)

9.4 Konzept

Um wie besprochen Stärken und Schwächen der Technologie herauszuarbeiten, muss im ersten Schritt überlegt werden, was „gute“ haptische Handschuhe ausmachen und was benötigt wird, um diese nachher im therapeutischen Rahmen sinnvoll nutzen zu können.

Ein erster Aspekt ist die bereits angesprochene Kalibrierung und die daraus resultierenden Fingerbewegungen innerhalb der virtuellen Welt. Nur wenn die Fingerbewegungen realistisch und genau genug in die virtuelle Realität übertragen werden, kann für eine natürliche und glaubwürdige Interaktion in der virtuellen Welt gesorgt werden. Um dies zu prüfen, kam die Idee auf, Gesten in der VR ausführen zu lassen, um die Qualität des Trackings zu überprüfen. Durch verschiedene Gesten, die unterschiedliche Fingerpositionen benötigen, kann auch für fachfremde Nutzer gut veranschaulicht werden, ob und wie gut sich diese Aufgabe ausführen lässt und wie verlässlich die Übertragung der Fingerbewegungen in die virtuelle Welt erfolgt. Hierzu nutzen die Manus Prime X Haptic VR Handschuhe pro Hand fünf 2DoF Sensoren und sechs 9DoF IMU's, um die Position und Rotation der Finger genau zu bestimmen. Die SenseGlove Nova hingegen besitzt einen 9-Achsen-Orientierungssensor am Handgelenk, so wie vier Sensoren zur Erfassung der Beugung und Streckung des Daumens, des Zeige-, Mittel- und Ringfingers. Ein zusätzlicher Sensor erfasst die Abduktion und Adduktion des Daumens.

Mit der Kalibrierung geht auch das Tracking einher. Nur wenn die reale Position der Hand im Raum zu dem virtuellen Abbild passt, können die Handlungen für den Nutzer nachvollziehbar abgebildet werden. Die passenden Bewegungen, so wie die Orientierung im Raum sind dabei von großer Bedeutung. In einem zweiten Schritt soll deshalb das Tracking der Handschuhe überprüft werden. Dazu sollen virtuelle Handflächen in der VR erscheinen, die Position und Rotation vorgeben und in welche die Probanden ihre Hände positionieren müssen. Sollten Position und Orientierung übereinstimmen, sollte ein neues Paar mit einer neuen Position und Orientierung im Raum erscheinen. Durch das mehrfache Wiederholen dieser Aufgabe kann die Qualität des Trackings besser eingeschätzt werden. Insbesondere für fachfremde Personen ist es mit dieser Aufgabe einfacher, Probleme hinsichtlich des Trackings zu benennen und zu beschreiben. Hierbei nutzen beide Haptiksysteme das Tracking über das Lighthouse System der *HTC VIVE*, jedoch wurde bei den Handschuhen von *MANUS* entschieden, die eigenen Tracker für das System zu nutzen, wohin gegen die SenseGlove Nova auf die Tracker der *HTC VIVE* zurückgreifen.

Nachdem das Tracking getestet wurde, kann auf die eigentliche Interaktion in der virtuellen Welt eingegangen werden. Diese ist ebenfalls abhängig von der Kalibrierung und der Qualität des Trackings, aber auch der technischen Umsetzung der Handschuhe selbst. Nur wenn sich die Interaktion intuitiv und den Erwartungen entsprechend anfühlt, scheint sie nach den Ergebnissen aus der Studie des TactSuit X40, auch die Präsenz positiv beeinflussen zu können (siehe Kapitel 8.6). Aus diesem Grund soll ein Aufgabentyp folgen, der sich auf die Interaktion mit Objekten konzentriert, ohne dabei die Haptik in den Fokus zu stellen.

Abschließend soll auch die unterschiedliche Haptik der Handschuhe miteinander verglichen werden. Dieser Aspekt fasst die zuvor getesteten Funktionen zusammen, da davon auszugehen ist, dass das Tracking und die Interaktion die Wirkung der Haptik im Falle der Handschuhe maßgeblich beeinflusst. So soll abschließend auch die Interaktion mit Objekten mit den unterschiedlichen taktilen Eindrücken geprüft werden. Dazu bietet das Plug-in von *SenseGlove* bereits eine optimierte Szene. In dieser sind Objekte mit unterschiedlichen Formen und Dichten auf einem Tisch platziert, mit denen interagiert werden kann. Da dies die Haptikaufgabe optimal adressiert, wurde entschieden, diesen Aufbau für beide Handschuhpaare zu nutzen, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Hierzu wurde die entsprechende Szene für die Manus Prime X Haptic VR Handschuhe angepasst. Daraus ergibt sich folgender Ablauf:

1. Überprüfen des Fingertrackings durch Gestenerkennung
2. Überprüfen des Trackings von Position und Orientierung der Hände
3. Interaktion ohne Haptik
4. Interaktion mit Haptik

Die genannte Reihenfolge dieser Aufgaben soll eingehalten werden, da ihre Komplexität aufeinander aufbaut. So können Gesten unabhängig von der Position im Raum getestet werden, die Interaktion mit Objekten benötigt jedoch ein verlässliches Tracking der Finger und Hände. So sollte nur mit einer komplexeren Aufgabe begonnen werden, sofern die vorherige Aufgabe erfolgreich abgeschlossen wurde.

9.5 Programmiertechnische Umsetzung

Nachdem die Aufgaben zum Vergleich der Handschuhe definiert waren, wurde mit der Umsetzung des Konzepts begonnen. Hierzu wurde wie bei allen Projekten dieser Arbeit die Entwicklungsumgebung *Unity* genutzt. Es wurde auf der Version 2021.3.2f1 entwickelt. Primär wurde auf einem Laptop mit einem Intel i9 Prozessor und einer *NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU* gearbeitet, auf welchem für die *HTC VIVE Pro* [135] entwickelt wurde. Für die Nutzung der SenseGlove Nova wurde das firmeneigene Software Development Kit „SenseGlove-Unity“ [277] eingebunden und für das Tracking wurden die *HTC VIVE Tracker 1.0* verwendet. Zur Verwendung der Handschuhe innerhalb der Anwendung werden das *[Link to VR Rig]*, das *[SG_User]* und das *[Room Calibration/Recenter]*-Prefab benutzt, denen das *[CameraRig]* der *SteamVR*, so wie die Tracker zugewiesen werden müssen.

Die Manus Prime X Haptic VR nutzen ebenfalls ihr firmeneigenes Plug-in „Unity Core Plugin (v1.9.0)“ [198] und darüber hinaus eigene Tracker, die mit dem Lighthouse-System der *HTC VIVE* kompatibel sind. Um die Handschuhe in der gewünschten Szene in *Unity* zu verwenden, werden lediglich die Prefabs *[VRPlayer]* und *[TrackerManager]* benötigt, welche die Bewegungen der Handschuhe samt Modell in die virtuelle Welt übersetzen.

Manus Core

Um die haptischen Handschuhe von *MANUS* mit dem Rechner zu verbinden, wird das externe Tool *Manus Core* benötigt. Dies ermöglicht die Nutzung der haptischen Eingabegeräte in Drittanbieter-Software, wie beispielsweise *Unity*. Ebenfalls können durch dieses Programm die Tracker des *SteamVR*-Systems über einen Reiter in der Anwendung verwaltet werden. Dies ermöglicht eine Zuweisung der Tracker zu den Handschuhen und eine Übertragung der Positionen und Rotationen der Tracker direkt in die VR-Anwendung. Zusätzlich wird auch die Kalibrierung der Handschuhe unter einem anderen Reiter des Programms vorgenommen. Dazu müssen pro Hand jeweils mehrere Gesten geformt werden, welche dann automatisch in eine Kalibrierung überführt werden. Die Bewegung der Handschuhe werden ebenfalls über das Programm visualisiert, wodurch eine Überprüfung der Kalibrierung einfach möglich ist und falls nötig erneut angepasst werden kann. Ratsam ist es, die Kalibrierung vor dem Start der *Unity*-Anwendung vorzunehmen, da es ansonsten zu Abstürzen der *Unity*-Anwendung kommen kann.

SenseCom

SenseCom ist ein von *SenseGlove* entwickeltes Programm, welches die Kommunikation zwischen der Anwendung und den haptischen Handschuhen ermöglicht. Es dient zur Verbindung der Handschuhe mit dem Rechner und kann zu jederzeit den Verbindungsstatus angeben. Ebenfalls sind Firmware Updates über diese Schnittstelle möglich. Ein weiteres wichtiges Feature ist die Kalibrierung der Handschuhe, die bei diesem Handschuhmodell bei jedem Start neu erfolgen sollte, um eine optimale Nutzung zu ermöglichen. Innerhalb der Anwendung werden die Handschuhe angezeigt und Bewegungen simuliert, welche vom Träger nachgeahmt werden müssen. Sobald das Programm optimal kalibriert ist, muss vom Träger eine *Thumb-Up* Geste vollführt werden, um die Einstellungen zu bestätigen und zu speichern. Die Kalibrierung kann jederzeit angepasst werden, auch während der laufenden *Unity*-Anwendung. Hierbei kommt es zu keinerlei Problemen.

Umsetzung des Ablaufs

Da aus dem zuvor vorgestellten Konzept eine Testanwendung konzipiert werden soll, welche dazu dient, die Hardware miteinander zu vergleichen, wurde auf eine komplexe UI oder die Angabe von Nutzerdaten verzichtet. Lediglich die Wahl des Handschuhmodells und somit die Wahl der Szene kann aus einer simplen UI zu Beginn ausgewählt werden.

Beide Szenen wurden hierbei möglichst identisch in ihrer Programmierstruktur aufgebaut und nutzen angepasste Versionen der gleichen Skripte. Um die Abfolge der einzelnen Aufgaben zu organisieren, wurde das *ManagerScript* implementiert. Dieses übernimmt den grundlegenden Ablauf innerhalb der Anwendung und organisiert alle besprochenen Schritte über Skripte, die nacheinander ausgeführt werden. Um einen Ablauf zu starten, wird über den Manager das zugehörige *bool hasStarted* des Schritt-Skriptes gesetzt, wodurch in diesem die nun benötigten Aktionen ausgeführt werden. Ein *bool* kann nur zwei Zustände annehmen, wahr oder falsch, worüber der Ablauf verlässlich gesteuert werden kann. Sobald alle Handlungen innerhalb dieses Schrittes absolviert wurden, setzt das Schritt-Skript das zugehörige *bool step_x* aus dem *ManagerScript* auf *true* und bestätigt den erfolgreichen Abschluss des Schrittes. Dadurch wird dann im *ManagerScript* das *bool hasStarted* des nächsten Schritt-Skriptes gesetzt und mit dessen Inhalt fortgefahren. So wird der gesamte Ablauf gehandhabt, um sicherzustellen, dass nicht mit einem komplexeren Schritt begonnen wird, bevor der vorherige abgeschlossen wurde.

Schritt 1: Gestenerkennung

Um Gesten zu erkennen, gibt es unterschiedliche Ansätze. *MANUS* bietet hierzu bereits eigene Skripte, welche anhand der Lage der unterschiedlichen Sensoren die Gesten errechnen und im Programm wiedergeben. Dies ist jedoch nicht mit dem SenseGlove Nova kompatibel, wodurch eine andere Lösung gefunden werden musste. Daher wurde entschieden, die Gestenerkennung durch Colliderabfragen zu lösen. So wurden jeder Fingerspitze ein *TriggerCollider* zugewiesen, der vom Nutzer in spezifische Punkte im Raum gelegt werden muss, wodurch sich eine Geste ergibt. Um hierbei die Gestenerkennung unabhängig vom Tracking zu bewerkstelligen, wurden die Gestenpunkte zu Kindobjekten der Handschuhe und können in jeder Positionierung deckungsgleich erreicht werden. Insgesamt wurden hierfür vier verschiedene Gesten entworfen (siehe Abbildung 26), die gleichzeitig von beiden Händen absolviert werden müssen. So wird für jeden Gestenpunkt geschaut, ob der entsprechende Finger diesen berührt. Ist dies der Fall, wird das Material des Gestenpunktes blau eingefärbt, andernfalls ist es rot (siehe Abbildung 25). Für jede Geste müssen so alle zehn Colliderabfragen erfolgreich und gleichzeitig absolviert werden, um die Aufgabe abzuschließen.



Abbildung 25: VR-Ansicht der ersten Aufgabenstellung (Manus)



Abbildung 26: Die verschiedenen Gesten der ersten Aufgabenstellung

Schritt 2: Tracking

Das Tracking wurde ähnlich wie die Gestenerkennung gelöst, jedoch mit weniger Colliderpunkten. So wurden diese neben dem Daumen und dem kleinen Finger, so wie auf dem Handgelenk platziert. Durch diese drei fixen Punkte kann die Orientierung und Position der Hand ausreichend bestimmt werden. Um die Orte im Raum zu markieren, an welche die Hände gelegt werden soll, wurden blaue Handmodelle mit halb transparenten Materialien genutzt, die entsprechende Collider besitzen. Die Abfragen im Skript fungieren kongruent zur Gestenerkennung mit drei Colliderabfragen pro Hand. Sollten alle Collider berührt werden, wird die Position der halb transparenten Handmodelle in ihrer Orientierung und Position verschoben, und der Nutzer wird erneut aufgefordert, seine Hände in die entsprechenden Modelle zu legen. Insgesamt gibt es drei verschiedene Abfragen, wobei sich die Position und Orientierung im Raum unterscheiden. Wenn alle Positionen nacheinander erfolgreich mit den eigenen Händen erreicht werden konnten, ist das Testen des Trackings abgeschlossen und es wird zur nächsten Aufgabe gewechselt. Die Umsetzung des Trackings unterscheidet sich bei den beiden Handschuhen. So können wie zuvor erwähnt die Tracker für die Handschuhe von *MANUS* bereits im *Manus Core* zugewiesen werden. Dies ist bei den SenseGlove Nova nicht möglich. Hier muss für jeden der beiden Tracker der *HTC VIVE* ein neues Objekt in *Unity* erstellt werden, welchem dann jeweils über das *SteamVR_Tracked Object*-Skript der entsprechende Tracker zugewiesen werden muss. Anschließend müssen diese neuen Objekte dann im *SG_VR_Rig* des *[Link to VR Rig]* der entsprechenden Hand zugewiesen werden.



Abbildung 27: Darstellung der Hände und Trackingpunkte im VR-Raum (Manus)

Schritt 3: Interaktion ohne Haptik

Das Greifen und Interagieren mit Objekten ist für beide Handschuhmodelle unterschiedlich implementiert und wird durch das entsprechende SDK und die zugehörigen Skripte vorgegeben. Um es dennoch so identisch wie möglich zu gestalten, wurden die gleichen Objekte zur Interaktion genutzt. So haben die Nutzer unterschiedlich große Grundformen, mit denen sie in diesem Schritt interagieren können. Diese sind auf einem Tisch platziert, der nach einer kurzen Wartezeit zwischen dem zweiten und dritten Schritt im Raum erscheint (siehe Abbildung 28). Sollte ein Objekt zu Boden fallen oder nicht mehr erreicht werden können, kann ein kleiner blauer Buzzer auf dem Tisch betätigt werden, welcher alle Objekte auf die ursprüngliche Position zurücksetzt.

Um Objekte mit den Manus Prime X Haptic VR Handschuhen greifen und werfen zu können, werden die Skripte *GrabbedObject* und *ThrowableObject* benötigt. Diese ermöglichen eine natürliche Reaktion auf die Interaktion mit den haptischen Handschuhen über die interne Gestenerkennung. Da in diesem Schritt noch kein haptischer Eindruck vermittelt werden soll, wurde das entsprechende Skript *HandHaptic* inaktiv geschaltet. Für die Interaktion mit den Sensegloves Nova benötigen die Objekte nur das *SG_Grabable*-Skript. Dadurch können Objekte gegriffen, bewegt und geworfen werden. Auch hier wurde auf den haptischen Eindruck verzichtet.

Um diesen Schritt zu beenden, können die Anwender einen roten Buzzer nutzen, der neben den virtuellen Tisch gestellt wurde. Sollte dieser mit einer der beiden Hände berührt werden, verschwindet der Tisch mit den Objekten und es wird zum letzten Schritt übergeleitet.

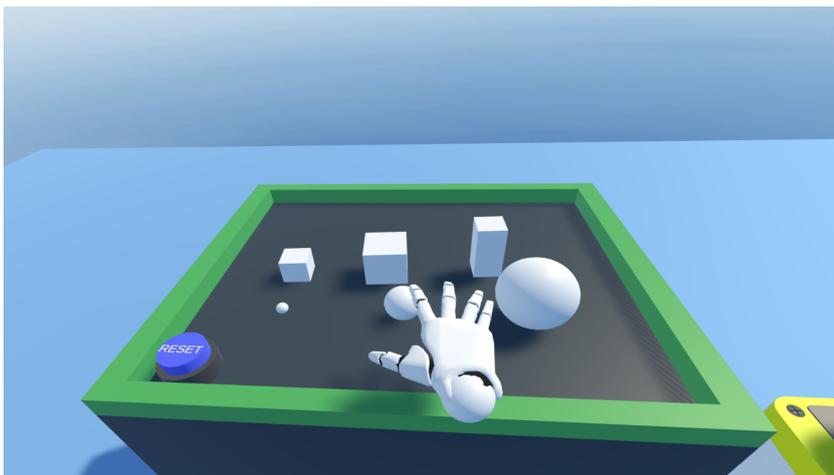


Abbildung 28: Tisch mit Objekten ohne haptischen Eindruck

Schritt 4: Interaktion mit Haptik

Im letzten Schritt der Testung werden nun alle Funktionen der jeweiligen Handschuhe zusammengeführt und mit der Haptik getestet. Dazu wird ein neuer Tisch eingeblendet, auf welchem neue Objekte platziert wurden, wieder in variabler Form und Größe, aber auch diesmal mit verschiedenem Verhalten. So gibt es Objekte, die sich nicht bewegen lassen, andere, die an der entsprechenden Position verbleiben, an der sie losgelassen wurden und wieder andere, die zerbrechen können. Insgesamt sind es neun verschiedene Objekte mit einer entsprechenden Beschreibung unterhalb ihrer Position (siehe Abbildung 29). Auch sie können wieder durch einen blauen Buzzer zurück an ihre ursprüngliche Position gesetzt werden.

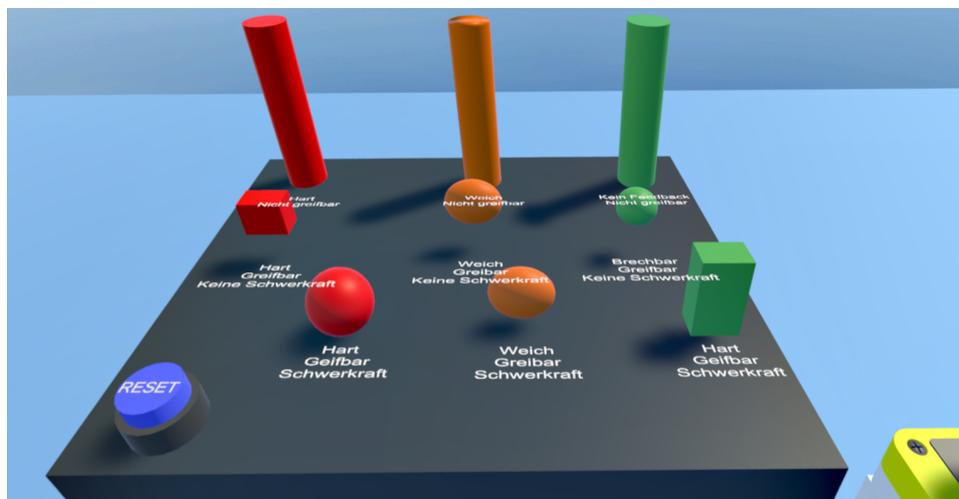


Abbildung 29: Tisch mit haptischen Objekten und zugehöriger Beschreibung

Die Testszene musste für die SenseGlove Nova kaum angepasst werden. Hier wurden die Objekte auf dem Tisch mit dem entsprechenden *SG_Grabable*- und *SG_Material*-Skript aus der firmeneigenen Beispielszene kopiert. Diese sind bereits für die Handschuhe optimiert und können das von den Entwicklern gewünschte Feedback am besten vermitteln, darunter auch den haptischen Eindruck von weichen bzw. harten Objekten. So wie bei der zuvor betrachteten haptischen Technik gibt es hier ebenfalls haptische Materialien, die im gleichen Sinne den haptischen Eindruck steuern, in diesem Falle, dass Force Feedback. Zusätzlich kann über das zugehörige Skript auch eingestellt werden, ob beispielsweise ein Objekt zerbrechlich ist oder der Daumen für die Interaktion benötigt wird.

Für die Manus Prime X Haptic VR musste deutlich mehr angepasst werden. Zunächst musste an dieser Stelle darauf geachtet werden, dass das entsprechende Skript für die Haptik *HandHaptic* im Code aktiviert wird. Da die Objekte aus der Beispielszene des SenseGlove Nova SDK stammen, benötigten alle Objekte zur Interaktion die Skripte *GrabbedObject* und *ThrowableObject*. Zusätzlich gab es zwei besondere Objekttypen. Zum einen die „weichen Objekte“. Der Effekt des Eindrückens von Objekten ist nur durch Skripte der Force Feedback Handschuhe möglich. Um einen ähnlichen visuellen Eindruck bei den Vergleichshandschuhen zu erzeugen, wurden der Ball und die entsprechende Stange, die als weiche Objekte gelten, mit Cloth nach modelliert. Dieses Skript von *Unity* macht Objekte flexibel und lässt sie wie Stoff wirken. So kann das Eindrücken der Objekte angenähert werden, ohne ein Force Feedback zu benötigen. Das andere Objekt war „zerbrechlich“. Auch dieser Effekt war den SenseGlove Nova vorbehalten. So wurde ein Skript für die Manus Prime X Haptic VR geschrieben, welches das Objekt nach kurzer Zeit zerbrechen lässt und dabei den gleichen visuellen Effekt nutzt wie das Objekt in der Vergleichsszene. Ziel war es, den visuellen Eindruck möglichst ähnlich zu halten, damit der Eindruck der Haptik dadurch nicht zu stark verändert wird. Sobald die Nutzer sich ausgiebig in dieser Szene ausgetestet haben und einen guten Gesamteindruck der Handschuhe mit der Haptik gewinnen konnten, können sie das Programm durch den roten Buzzer schließen und den Durchlauf beenden.

Raumdesign

Das Raumdesign der Testszenen wurde bewusst simpel gehalten. Die Aufmerksamkeit des Nutzers soll sich auf die Aufgaben fokussieren, damit die Technik sinnvoll bewertet werden kann. Demnach wurde ein leerer Raum gewählt, welcher lediglich aus einem neutral farbigen Boden und einem Himmel besteht. Für die Interaktionsobjekte wurde ein Tisch platziert, von welchem aus der Nutzer die Objekte direkt greifen kann. Um dennoch das Wohlbefinden der Nutzer zu berücksichtigen, wurde ein weitläufiger, heller Raum geschaffen, der die Personen nicht einengt. Dabei wurde sich auf die Ergebnisse von Gao et al. [100] in Kapitel 4.3.1 Angststörungen bezogen, die feststellen konnten, dass sich die Umgebung auf das Wohlbefinden auswirkt und geschlossene Bereiche einen negativen Effekt auf die Stimmung haben können.

9.6 Studiendesign

9.6.1 Studienaufbau

Ziel der Anwendung war es, die beiden haptischen Handschuhpaare in den unterschiedlichen vorgestellten Aufgabenfeldern zu testen und die Vor- bzw. Nachteile der beiden Modelle herauszuarbeiten. Aus diesem Grund wurden zwei Durchläufe gestaltet, in welchen jeweils eine der beiden Techniken unabhängig voneinander getestet wurde. Dementsprechend gab es einen Durchlauf mit den Manus Prime X Haptic VR (M) und einen Durchlauf mit den SenseGlove Nova (S).

9.6.2 Art der Erhebung

In dieser Anwendung wurden im Gegensatz zur VR-Memory-Studie 8.5 andere Schwerpunkte gesetzt, die in der vorliegenden Untersuchung bewertet werden sollten. Der Hauptfokus lag auf der Technik und ihrer Funktionalität und weniger auf Aspekten wie der Präsenz. Aus diesem Grund wurden Fragebögen zu diesem Thema ausgelassen.

Einzig der Haptikfragebogen von Cappello et al. [37] und der zuvor konzipierte Fragebogen zur Erhebung der Technikkompetenz wurde aus der vorherigen Studie übernommen. Da die Haptik in dieser Anwendung ein Kernaspekt darstellt, war es wichtig, diesen durch bereits genutzten Fragebogen zu evaluieren, um so mögliche Vergleiche ziehen zu können. Ebenso scheint die Wirkung der Haptik nach Gracia et al. [102] von der Technikerfahrung und -kompetenz abzuhängen, weshalb es wichtig war, diese ebenfalls mit zu erheben.

Ergänzend wurden eigene Fragen, die zusätzlich auf die Nutzung der Handschuhe in den einzelnen Aufgabenfeldern eingehen, definiert. Ziel dieser war es, die Eindrücke von den Fragen von Cappello et al. abzugleichen und zusätzlich mehr über die Performance und Wirkung der Handschuhe in Erfahrung zu bringen. Dabei wurde darauf geachtet, die Fragen so zu formulieren, dass keine Antworttendenzen entstehen.

Zusätzlich wurde ein Fragebogen konzipiert, welcher die Handschuhe direkt gegenüber stellt. So ist es möglich, Präferenzen der Nutzer direkt herauszustellen und zu schauen, wie die Handschuhe in einem direkten Vergleich bewertet werden. Dies ist insbesondere für einige der Forschungsfragen relevant.

Für alle Fragen wurde erneut auf eine Likert-Skala mit sieben Werten zurückgegriffen. Die Bewertung reicht von -3 bis 3. 3 entspricht hier einer vollen Zustimmung und -3 einer starken Ablehnung der Aussage.

9.6.3 Ablauf der Studie

Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurde auch hier eine Pseudorandomisierung in der Reihenfolge der einzelnen Szenen vorgenommen. So konnte sichergestellt werden, dass gleich häufig mit den unterschiedlichen Handschuhmodellen begonnen wurde. Dementsprechend ist nicht davon auszugehen, dass die Ergebnisse durch diesen Effekt beeinflusst wurden.

Zu Beginn der Studie wurde das erste Handschuhmodell kalibriert. Bei beiden Anwendungen wurden dazu die Probanden zum PC-Bildschirm gebeten und gemeinsam mit dem Testleiter die Kalibrierung durchgeführt. Stimmten die Einstellungen, begann dann die eigentliche VR-Anwendung. In dieser wurde die Kalibrierung durch die erste Aufgabe geprüft. Konnten die Gesten nicht wie gewünscht geformt werden, wurde die Kalibrierung mit der entsprechenden Software wiederholt. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass bei Problemen mit beiden Handschuhpaaren gleich verfahren wurde, damit es dort zu keinen Unterschieden in der Bewertung kam, sofern Schwierigkeiten aufgetreten sind.

Anschließend wurden die Testpersonen angeleitet, die vier gestellten Aufgaben nacheinander zu absolvieren. Sie wurden zusätzlich mündlich angewiesen, sofern es Fragen gab, da die Anwendung als Demonstrator diene und der Fokus gänzlich auf der Technik liegen sollte. Nach dem erfolgreichen Beenden des ersten Durchlaufes erfolgte die Befragung zur entsprechenden Hardware. Durch die Erhebung der Technikkompetenz, so wie der Haptikfragen nach Cappello et al. und der eigens konzipierten Fragen kann so ein ausreichender Eindruck zur Technik erfasst werden. Nach dem Ausfüllen der Fragebögen erfolgte der gleiche Durchlauf mit dem Vergleichspaar.

Abschließend wurde nach dem Absolvieren beider Durchläufe der Vergleichsfragebogen angehängen. So konnten die Probanden entsprechend ihrer Erfahrungen die Handschuhe in der Wertung gegeneinanderstellen und angeben, in welchen Aspekten sie welchen haptischen Handschuh überlegen sahen, oder ob es Bereiche gab, in welchen die Handschuhe gleich gute Ergebnisse erzielten.

9.7 Ergebnisse

Insgesamt haben an dieser Studie zehn Personen teilgenommen. Davon waren 60% Frauen und 40% Männer. Das Durchschnittsalter aller Probanden betrug 27,8 Jahre. Auch hier wurde bei der Auswertung der Fragebögen auf den arithmetischen Mittelwert sowie den Median geschaut, um einen möglichst unverzerrten Eindruck der Ergebnisse zu bekommen.

Technischer Hintergrund der Probanden

Die allgemeine technische Kompetenz der Teilnehmer lag mit einem Wert von 1,4 etwas über dem Mittelmaß. So sagten alle Probanden aus, dass sie ihren Computer jeden Tag nutzten. Wie lange pro Tag war sehr unterschiedlich. So reichte die Spanne von unter einer Stunde bis mindestens acht bis zehn Stunden täglich. Das Smartphone wurde von 80% zwischen einer und fünf Stunden verwendet. Nur zwei Probanden gaben an, es länger am Tag zu nutzen. Erfahrungen mit VR wurden durchschnittlich mit einer 0,6 bewertet. Zwei Teilnehmer hatten noch keinerlei Erfahrung mit VR, zwei weitere Teilnehmer ein bisschen und die anderen 60% konnten bereits mehr Erfahrungen sammeln, die sich jedoch deutlich im Grad unterschieden. Nur eine Person gab an, ein VR-Experte zu sein.

Evaluation der Haptik nach Capello et al.

Nach dem Erfragen der technischen Kompetenzen wurde mit dem Fragebogen von Capello et al. fortgefahren. Dieser wurde genutzt, um die in der Anwendung verwendeten Haptik zu evaluieren. Die Ergebnisse können in Tabelle 5 nachgeschlagen werden.

Frage:	Manus	SenseGlove
1. Wie gut konnten Sie sich auf das haptische Feedback verlassen?	1,1 (1,5)	1,4 (2)
2. Wie gut konnten Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?	2 (2)	2,3 (2,5)
3. Wie realistisch war das haptische Feedback?	0,7 (1)	1,6 (2)
4. Wie sehr haben das haptische und visuelle Feedback übereingestimmt?	1,2 (1,5)	1,2 (1,5)
5. Wie gut konnte das haptische Gerät gesteuert werden?	1,6 (2)	1,2 (1,5)
6. Wie gut empfanden Sie die Erfahrung insgesamt?	1,8 (2)	2,1 (2,5)
7. Wie sicher fühlten sie sich mit dem haptischen Feedback ?	1,3 (2)	1,3 (2)
8. Wie gut konnten Sie die gestellte Aufgabe erfüllen?	2,1 (2)	2,1 (2)

Tabelle 5: Mittelwert und (Median) nach Cappello et al.

Wie die Auswertung nach Cappello et al. zeigt, schneiden die SenseGlove Nova insgesamt etwas besser ab als das Vergleichspaar, die Manus Prime X Haptic VR. Der haptische Eindruck scheint besonders positiv bei den Force Feedback Handschuhen wahrgenommen zu werden. So ist die Verlässlichkeit (M:1,5 S:2) und insbesondere der Realismus des haptischen Feedbacks (M:1 S:2) höher bewertet worden. Dies scheint auch die Qualität der Erfahrung zu erhöhen (M:2 S:2,5), obwohl die Sicherheit mit der Haptik und das Erfüllen der Aufgabe gleichermaßen bei beiden Vergleichspaaren bewertet wurde. Einzig und allein die Steuerung scheint bei den haptischen Handschuhen von *MANUS* mehr zu überzeugen als bei dem das Vergleichspaar (M:2 S:1,5). Beide Handschuhpaare schneiden jedoch insgesamt gut ab und die Bewertungen liegen deutlich über dem Mittelmaß, was darauf hindeutet, dass die Geräte grundsätzlich gut wahrgenommen wurden.

Evaluation durch eigene Fragen

Die selbst konzipierten Fragen legten neben der Betrachtung der Haptik den Fokus auf die Technik der Datenhandschuhe selbst. Die Fragen und Wertungen können in der folgenden Tabelle 6 nachgeschlagen werden:

Fragen:	Manus	SenseGlove
1. Die Handschuhe waren angenehm zu tragen.	2,4 (3)	1,9 (2)
2. Bei der Kalibrierung der Handschuhe hatte ich Probleme.	-1,8 (-2)	-1,9 (-2,5)
3. Die Handschuhe waren zu schwer.	-2,3 (-3)	-1,3 (-2)
4. In der virtuellen Realität wirkten meine Hände gut repräsentiert.	1,5 (1,5)	1,9 (2)
5. Die Bewegung meiner Hände wurde ohne Verzögerung in die VR übertragen.	0,8 (1,5)	1,2 (2)
6. Das Formen der Gesten fiel mir schwer.	-1,6 (-2,5)	-0,6 (-1,5)
7. Die Gesten wurden verlässlich erkannt.	2 (2)	1,2 (2)
8. Ich konnte die Hände verlässlich im zweiten Schritt der Anwendung in die vorgesehenen Plätze platzieren.	2,2 (3)	2,4 (2,5)
9. Das Greifen der Objekte fiel mir leicht.	2,3 (3)	2,1 (2)
10. Das haptische Feedback hat funktioniert.	1,9 (2)	2,3 (2,5)
11. Das haptische Feedback half mir beim Greifen.	1,2 (1,5)	1,6 (2)
12. Das haptische Feedback fühlte sich realistisch an.	1,4 (1,5)	1,3 (1,5)
13. Ich hatte Angst die Handschuhe zu beschädigen.	-1,3 (-2,5)	-1,6 (-2)

Tabelle 6: Mittelwerte und (Median) der selbst konzipierten Fragen zum Vergleich der Handschuhe

Die Fragen 1 und 3 beschäftigen sich mit dem Komfort der Handschuhe. Dieser überzeugte bei den ca. 250g leichteren Manus Prime X Haptic VR, die insgesamt komfortabler eingestuft wurden (M:3 S:2). Dafür erschien die Kalibrierung bei den SenseGlove Nova etwas einfacher. Dies erklärt sich durch die Kalibrierungsmethode. Bei den SenseGlove Nova wird dazu nur eine wiederholende Bewegung der Hände benötigt, wobei die Vergleichshandschuhe hier für jeden Handschuh einzeln durch mehrere Gesten kalibriert

werden müssen. Die Repräsentation der Hände in der virtuellen Realität wurden bei den SenseGlove Nova um 0,4 (0,5) Punkte besser bewertet (Frage 4 und 5). Dies könnte auf die verschiedenen Handmodelle der unterschiedlichen SDKs zurückzuführen sein, aber auch mit dem Tracking zusammenhängen.

Die erste Aufgabe konnte entsprechend der Auswertung mit den Handschuhen von *MANUS* besser absolviert werden. Das Formen der Gesten schien mit den komfortablen Handschuhen besser funktioniert zu haben, wohingegen die Verlässlichkeit der Erkennung der Gesten sehr unterschiedlich wahrgenommen wurde. Da die Handschuhe nicht für alle Personen passgenau waren und das Formen der Gesten durch das „Exoskelett“ der Force Feedback Handschuhe erschwert wurde, kann sich diese Wertung erklärt werden.

Bei der Bewertung der zweiten Aufgabe war die Meinung ebenfalls sehr unterschiedlich. So empfanden je nach betrachteten Wert die Probanden die Erfüllung der Aufgabe im Durchschnitt mit den SenseGlove Nova einfacher, wobei der Median auf die Manus Prime X Haptic VR hindeutet. Hier könnten ebenfalls die Limitationen des Raumes oder der Passgröße eine Rolle gespielt haben. Jedoch lagen die Werte durchschnittlich über einem Wert von zwei, was darauf schließen lässt, dass die Aufgabe insgesamt mit beiden Paaren gut abgeschlossen werden konnte.

Die Bewertung des Eindrucks beim Greifen von Objekten war eindeutiger. Hier wurden die vibrotaktilen Handschuhe besser bewertet. Das haptische Feedback hat dafür bei beiden Handschuhen in den meisten Fällen gut funktioniert (M: 1,9 S: 2,3). Der etwas geringere Wert bei den Manus Prime X Haptic VR lässt sich durch das etwas zurückhaltendere Feedback durch die Vibration erklären, welches bei jedem Objekt gleich stark ist. So gaben auch mehr Personen an, dass das Force Feedback besser beim Greifen in der virtuellen Welt unterstützt hat (S:1,6 M:1,2). Anders als bei der Frage von Cappello wurde der Realismus des haptischen Feedbacks gleich bewertet (1,5). Möglicherweise resultiert dies aus der Umformulierung der Frage. So steht die Frage „Wie realistisch war das haptische Feedback?“ der Frage „Das haptische Feedback fühlte sich realistisch an“ gegenüber. Insgesamt wurden beide Paare von den Probanden als robust wahrgenommen, auch wenn dies ebenfalls sehr individuell bewertet wurde.

Zusätzlich gaben einige Probanden noch weitere Informationen über den Freitext ab. In diesen werden die SenseGlove Nova für ihr realistisches Feedback gelobt, wobei jedoch eine Person anmerkte, dass das Greifen dadurch etwas ungenauer wirkte. Bei den *MANUS*-Handschuhen wurde die Einbindung gelobt, jedoch konnte dort die Haptik nicht ganz überzeugen.

Vergleich: *SenseGlove Nova* zu *Manus Prime X Haptic VR*

Abschließend nach dem Testen beider Szenarien wurden die Handschuhe direkt miteinander verglichen. Hier konnten die Probanden angeben, welchen Handschuh sie in welcher Kategorie besser empfanden oder ob sie beide Handschuhe gleich bewerten würden. Die Verteilungen können in Tabelle 7 nachgeschlagen werden.

Frage	Manus	SenseGlove	Gleichermaßen
1. Welcher Handschuh lässt sich besser anziehen?	40%	20%	40%
2. Welcher Handschuhe ist Ihrer Meinung nach komfortabler?	70%	10%	20%
3. Welcher Handschuh ließ sich einfacher kalibrieren?	20%	50%	30%
4. Bei welchem Handschuh gab es weniger Probleme?	30%	40%	30%
5. Welches haptische Feedback bevorzugen Sie?	10%	70%	20%
6. Welcher Handschuh konnte die realen Bewegungen besser in die VR übertragen?	30%	60%	10%
7. Mit welchem Handschuh fiel Ihnen die Aufgabe einfacher zu bewältigen?	50%	40%	10%
Welchen Handschuh würden Sie eher nutzen wollen?	20%	50%	30%

Tabelle 7: Vergleich der beiden Handschuhpaare durch die direkte Gegenüberstellung in Prozent

Die Tabelle unterstreicht noch einmal die bisher erfassten Ergebnisse. So werden die Manus Prime X Haptic VR von mehr Leuten als komfortabler wahrgenommen (Frage 1-2). Die Kalibrierung, die zwar bei beiden Modellen keine Probleme erzeugt haben, wird bei den SenseGlove Nova einfacher eingestuft. Bei dem Vergleich wird deutlich, dass das realistischere Force Feedback insgesamt von einer Mehrheit bevorzugt würde und die SenseGlove Nova zusätzlich die Hände entsprechend der Auswertung besser in der virtuellen Realität darstellen, auch wenn dies bei der Gesten-Aufgabe nicht unterstützen konnte. Dennoch würden insgesamt mehr Leute die SenseGlove Nova erneut nutzen wollen.

Auch hier wurden die Antworten durch einen Freitext ergänzt, den sechs Teilnehmer ausgefüllt hatten. An dieser Stelle gaben fünf dieser Teilnehmer an, dass sie die SenseGlove Nova bevorzugen. Insbesondere das Force Feedback wurde hier hervorgehoben, ebenso wie die einfachere Kalibrierung und die wenigen Probleme. Die sechste Person empfand beide Handschuhe als gleichermaßen sinnvoll und schrieb: „Beide Handschuhe waren für mich angenehm zu tragen und zu nutzen. Beide hatten Vor- wie Nachteile in der Anwendung. Eine Entscheidung zugunsten eines der beiden Handschuhe bedarf meiner Ansicht nach weiterer Anwendung“.

9.7.1 Zusammenfassung

Die Evaluation der Aufgaben zeigt bereits Tendenzen, die dabei helfen können, haptische Handschuhe in den richtigen Kontext in VR-Therapien einzuarbeiten. So scheinen die Manus Prime X Haptic VR Handschuhe beim Erfüllen der Gestenaufgabe den SenseGlove Nova überlegen, obwohl die reine Darstellung der Handschuhe in der virtuellen Realität bei den Handschuhen der Firma *SenseGlove* mehr überzeugt. Da die haptischen Handschuhe von *MANUS* auf Gesten basieren und auch die Technik des Greifens und Werfens von Objekten davon abhängt, lässt sich diese Erkenntnis gut nachvollziehen. Zusätzlich scheint das „Exoskelett“ der *SenseGlove Nova* die Bewegung einzuschränken, wodurch nicht jede Geste gleich gut geformt werden konnte. Ein Aspekt, der bei den als sehr komfortable bewerteten *MANUS* weniger ins Gewicht fällt. Zusätzlich bieten die SenseGlove Nova keine Erkennung des kleinen Fingers an. So bewegt sich dieser immer mit dem Ringfinger mit, wodurch es hier zu Einschränkungen kommen kann.

Das Tracking der Handschuhe im Raum funktionierte in beiden Szenarien sehr verlässlich. Der geringe Unterschied könnte aus der Darstellung der Hände oder aus einer minimalen Verzögerung des zwischengeschalteten Programms *Manus Core* resultieren oder auf die Raumbegrenzung zurückzuführen sein. So war der verwendete VR-Raum recht klein und es musste mit den Trackern häufig am Rand gearbeitet werden, wodurch sie den getrackten Bereich schnell verließen. Da die Werte jedoch nahe genug beieinanderliegen, scheint hier der Einfluss für beiden Handschuhen ähnlich bewertet.

Das Greifen und Interagieren hat mit beiden Handschuhen gut funktioniert. Einzig das Exoskelett hat zu einigen Einschränkungen geführt, was sich jedoch nur in einem geringen Maße in den Zahlen wiederfinden lässt. Werte über zwei zeigen auf, dass es kaum Probleme bei der Interaktion mit den Handschuhen gab und diese Aufgaben sind, wofür sich diese Technologien eignen.

Das unterschiedliche Feedback gab eine ähnlich gute Unterstützung beim Erfüllen der Aufgaben. So wurde die Schwierigkeit bei beiden Handschuhen sehr ähnlich gewertet. Zwar schien das Force Feedback beim Greifen minimal besser zu unterstützen, doch insgesamt konnte keiner der beiden Handschuhe die Aufgaben besser bewältigen. Hier sind die Antworten sehr ausgeglichen (M:50% S:40% Beide: 10%).

9.7.2 Fazit

Zusammenfassend zeigt die gesamte Evaluation der beiden haptischen Handschuhe wichtige Ergebnisse hinsichtlich der zu betrachtenden Forschungsfragen.

Von der technischen Seite aus waren beide Handschuhmodelle gut durch ihre firmeneigenen Software Development Kit (SDK) in die Anwendung zu integrieren und benötigten nur an einigen Stellen kleine Zusätze, wie beispielsweise das Zuweisen der Tracker bei den SenseGlove Nova oder die Behandlung von Json.dll Probleme bei den Manus Prime X Haptic VR. Diese konnten jedoch ohne großen Aufwand behoben werden.

Die beiden Programme, die zur Kalibrierung und Integration der Handschuhe benötigt werden, konnten ebenfalls überzeugen. Hier bot das Programm von *SenseGlove* etwas weniger Funktionalität. Dies wirkt sich insbesondere auf die Kalibrierung aus, die dadurch sehr simpel umgesetzt wurde und kein technisches Vorwissen benötigt, was innerhalb einer therapeutischen Praxis einen Mehrwert hätte. Auch von den Probanden wurde die Kalibrierungsart als einfacher eingestuft und konnte meistens nach einmal zeigen frei und ohne Anleitung vom Programm wiederholt werden. Dies war bei den *MANUS*-Handschuhen nicht umsetzbar. Hier muss jeder Handschuh einzeln kalibriert werden, wobei spezielle Gesten nacheinander geformt und aufrechterhalten werden müssen. Nicht nur war der dementsprechende Kalibrierungsaufwand höher, häufig musste dieser Ablauf mehrfach wiederholt werden, sofern die Gesten nicht optimal erkannt wurden. Insbesondere Teilnehmer mit kleinen Händen hatten hier deutlich mehr Probleme, da der Daumen wohl für größere Hände ausgelegt war, trotz dass für die Studie bereits die kleinste erhältliche Größe der Handschuhe angeschafft wurde. Dafür musste die Kalibrierung nicht bei jedem Start erneuert werden, was den Aufwand minimierte.

Insgesamt schneiden die SenseGlove Nova basierend auf den Angaben der Probanden dennoch etwas besser ab als die Manus Prime X Haptic VR. So scheint trotz des etwas geringeren Komfort, die haptischen Handschuhe von *SenseGlove* mehr überzeugen zu können. Die Hälfte der Probanden würde sich für die Handschuhe entscheiden und zwei sehen die Technik auf einer Stufe mit den Handschuhen von *MANUS*. Dies lässt sich insbesondere auf den haptischen Eindruck zurückführen, der innerhalb der meisten Befragungen deutlich von den Probanden hervorgehoben wurde. 70% der Teilnehmer bevorzugen das Force Feedback gegenüber dem vibrotaktilen Feedback. Ebenfalls schien die Repräsentation der Hände etwas besser als bei dem Vergleichspaar. Auch dies schien sich auf den Gesamteindruck auszuwirken.

An dieser Stelle sind noch einmal die Unterschiede zwischen einigen Bewertungen bei der Betrachtung des Durchschnitts und des Median hervorzuheben. Hier zeigt sich, dass einige Aspekte der Bewertung sehr individuell sind und durch weitere und größere Studien erhoben werden müssen. So bieten beide Handschuhe Vor- und Nachteile, die von den Probanden unterschiedlich stark gewichtet wurden.

Dennoch scheinen diese Unterschiede einer Anbindung der Handschuhe in therapeutische Anwendung nicht im Wege zu stehen. Lediglich die etwas komplexere Kalibrierung der *MANUS*-Handschuhe könnte sich im Therapiealltag als schwieriger erweisen, jedoch wird diese durch das Programm gut angeleitet. Die SenseGlove Nova sind durchaus solide und schränken nur durch ihren etwas geringeren Komfort die Bewegungsfreiheit ein, was jedoch in einer immersiven Virtual Reality-Anwendung in den Hintergrund treten könnte. Basierend auf den Ergebnissen wurde entschieden, beide Handschuhpaare in eine therapeutische Anwendung einzubinden und sie in dem virtuellen Umfeld einer immersiven Anwendung noch einmal zu evaluieren, um die bisherigen Ergebnisse abzugleichen und ihren möglichen Nutzen für den Therapiebereich genauer zu erfassen.

10 Einbindung haptischer Handschuhe in die Suchtentwöhnungsanwendung ANTARES

10.1 Einleitung

Nachdem die beiden haptischen Handschuhmodelle ausführlich miteinander verglichen wurde, war der nächste Schritt die Einbindung der Hardware in eine Therapieanwendung. Durch diese Integration wurde erwartet, weitere Antworten auf die gestellten Forschungsfragen zu erhalten. Insbesondere der Faktor der Immersion und Präsenz stand hier wieder im Vordergrund. Dieser wurde zuvor ausgelassen, ist jedoch von besonderer Bedeutung für die Haupthypothese.

Durch die Kooperation mit Dr. Eiler, ergab sich die Möglichkeit, die Manus Prime X Haptic VR in die bereits evaluierte VR-Suchtentwöhnungs-Anwendung *ANTARES* zu integrieren. Diese wurde bereits im Kapitel 4.3.5 Substanzabhängigkeit vorgestellt. Sie adressiert die Abhängigkeiten von Zigaretten und Alkohol und konnte nachweislich in Bezug auf Zigaretten den Konsum senken [182].

10.2 Grundlagen

Die Anwendung *ANTARES* zur Suchtentwöhnung basiert, wie bereits vorgestellt, auf dem psychologischen Verfahren des *Approach Avoidance Task* (AAT). Die Idee ist es, Handlungstendenzen durch Annäherungs-Vermeidungs-Aufgaben zu modifizieren. Annäherung kann durch das Verringern der Distanz zwischen dem Anwender und einem (positiv) bewerteten Aspekt ermöglicht werden. Vermeidung hingegen ist das Erhöhen der bestehenden Distanz zu dem Suchtreiz. Wenn dieser Vorgang stetig wiederholt wird, kann es dazu führen, dass der Bezug zum Suchtreiz abnimmt.

Diese Annäherung bzw. Vermeidung von Reizen wurden von Dr. Eiler in die virtuelle Realität übertragen. Hier müssen die Anwender positiv bewertete Aspekte in Form von Alltagsgegenständen wie Hygieneartikel, Stifte und Obst in einen Karton vor sich einsortieren, die Suchtreize hingegen von sich weg in einen Mülleimer auf der gegenüber liegenden Seite des virtuellen Raumes.

Wie bereits im Kapitel 4.3.5 erläutert, konnte das Training in einer großen Studie als wirksam eingestuft werden. Durchschnittlich konnte der Zigarettenkonsum der Teilnehmer um fast die Hälfte reduziert werden.

10.3 Konzept

Es wurde entschlossen, die Manus Prime X Haptic VR Handschuhe in dem Feld der Suchtentwöhnung zu verwenden und ihre Wirkung der ursprünglichen Interaktion gegenüberzustellen.

Diese Entscheidung wurde maßgeblich durch die zuvor erhobene Vergleichsstudie 9.7 beeinflusst. Der Fokus des Nutzers soll bei der Sortieraufgabe weniger auf der Interaktion selbst und mehr auf den Markern der Objekte liegen. Da die haptischen Handschuhe von *MANUS* durch ihr geringes Gewicht und hohen Komfort leichter in den Hintergrund treten können und gleichzeitig das Greifen mit den Handschuhen als leichter eingestuft wurde, schienen diese sich besser für die Aufgabe zu eignen.

10.4 Details zur Implementation

Die Steuerung innerhalb *ANTARES* wurde zuvor mit den *HTC VIVE* Controllern oder der Leap Motion [346] umgesetzt. In der angesprochenen Studie wurde auf die Steuerung mit dem Leap Motion Controller gesetzt, da die Infrarotkameras den Teilnehmern ermöglicht, ihre eigenen Hände zu nutzen, um mit den Objekten zu interagieren.

Jedoch hat die Nutzung dieser Technik zwei große Nachteile. So werden die Hände nicht bei allen Personen immer verlässlich erkannt. Es kann also dazu kommen, dass die Hände nicht gut oder gar nicht getrackt werden können. Insbesondere schlecht durchblutete Hände werden häufig schlechter detektiert. Der zweite Nachteil ist das Tracking der Hände außerhalb des Kamerasichtfeldes. Geraten die Hände außerhalb oder überdecken sie sich, verschwinden die Hände, da sie nicht mehr von der Kamera erkannt werden. Gegriffene Objekte verbleiben an ihrer Position, fallen jedoch zu Boden, sobald sie wieder sichtbar werden.

Haptische Handschuhe könnten diese Probleme umgehen, da sie auch außerhalb des Sichtfeldes und unabhängig von Faktoren wie der Durchblutung der Hände verlässlich getrackt werden können. So könnte das versehentliche Fallenlassen von Objekten durch fehlendes Tracking verhindert werden, wodurch sich die Nutzbarkeit erhöhen könnte. Auch könnte die Immersion von diesem Effekt profitieren, die durch das haptische Feedback der Handschuhe zusätzlich verstärkt werden könnte. Auch wenn das haptische Feedback im direkten Vergleich nicht so realistisch eingestuft wurde wie das der SenseGlove Nova, könnte das taktile Empfinden das Erlebnis gegenüber des Leap Motion Controllers verbessern.

Umsetzung der Implementation

Die Integration der Handschuhe wurde von Dr. Eiler übernommen. Hierzu wurde das bereits zuvor vorgestellte *MANUS* Plug-in „Unity Core Plugin (v1.9.0)“ [198] verwendet. Um die Nutzbarkeit weiter zu erhöhen, wurde jedoch nur das *GrabbedObject*-Skript für die einzusortierenden Objekte verwendet. So war es möglich, die Objekte zu greifen, jedoch nicht zu werfen. Demnach übernahm das Objekt nicht die Geschwindigkeit der Handschuhe und fiel an der Stelle herunter, an welcher es losgelassen wurde.

Nach der Integration wurde dann das neue Projekt für die Evaluation zur Verfügung gestellt. Im folgenden Bild, Abbildung 30 kann die Anwendungsszene einmal aus der VR-Sicht betrachtet werden. Hier sieht man den Tisch, auf welchem derzeit ein auf die Sucht bezogenes Objekt liegt. Dieses ist rot umrandet, also sollte es in den schwarzen Mülleimer hinter dem Tisch einsortiert werden, über welchem das Wort „RED“ steht. Wäre das Objekt blau umrandet, müsste es in den Karton vor dem Tisch. Dies simuliert die zuvor beschriebene Annäherungs-Vermeidungs-Aufgabe, die bei früheren computergestützten Varianten mit einem Joystick umgesetzt wurde.



Abbildung 30: VR-Ansicht der *ANTARES*-Anwendung mit einem rot markierten, raucherbezogenen Objekt

10.5 Studiendesign

10.5.1 Studienaufbau

Um die Manus Prime X Haptic VR Handschuhe nun in dieser immersiven Therapieanwendung zu evaluieren, wurde beschlossen, die Probanden zuvor die originale Anwendung (O) mit der Leap Motion Steuerung testen zu lassen. So konnten sich die Testpersonen einen unverfälschten Eindruck der originalen Anwendung machen, um im Nachfolgenden die Ergänzung der Manus Prime X Haptic VR besser bewerten zu können. Auf Basis der Erfahrung mit der originalen Szene sollten sie dann die modifizierte Anwendung (M) mit den haptischen Handschuhen nutzen, um diese neue Interaktionsoption optimal vergleichen zu können.

10.5.2 Art der Erhebung

Die Evaluation der haptischen Handschuhe ist mit der Evaluation des TactSuit X40 vergleichbar (siehe auch Kapitel 8.5). So stand in beiden Fällen die Testung von neuer, auf dem Markt verfügbarer haptischer Technologie innerhalb einer immersiven Therapieanwendung im Vordergrund, so wie die Erhebung des Einflusses der Haptik auf die Anwendung. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Studien zu schaffen, wurde sich dazu entschieden, die gleichen Fragebögen zu verwenden, da sich die Ziele der Erhebung gleichen.

So ist auch hier die Immersion und Präsenz ein wichtiges Kernthema, welches gut durch die standardisierten Präsenzfragebögen nach *igroup* [138] und Stems (Version 2) [378] evaluiert werden kann. Auch der Haptikfragebogen nach Cappello et al. [37] erwies sich bisher als sinnvolle Quelle zum Erheben von Eindrücken von Anwendungen mit haptischen Integrationen. Insbesondere ein Vergleich zur vorherigen Studie mit den Handschuhen von *MANUS* könnte so ermöglicht werden.

Zusätzlich wurden einige der selbst konzipierten Fragen aus der Vergleichsstudie 9.7 auch für diese Evaluation genutzt, um die Wirkung und Nutzbarkeit der Handschuhe auch innerhalb dieser Szenerie zu erheben.

Wie bei allen Studien zuvor wurde ein Fragebogen zur Technikerfahrung vorgeschoben, der die bisherigen Erfahrungen mit der virtuellen Realität erheben sollte.

Um die Ergebnisse am Ende in einen gesamten Kontext zusammenfassen zu können, wurde auch hier auf die Likert-Skala mit 7 Werten zurückgegriffen, die eine Skala von -3 bis 3 besitzt, wobei 3 die volle Zustimmung und -3 eine volle Ablehnung der Aussage bedeutet hat.

10.5.3 Ablauf der Studie

Anders als zuvor wurde bei dieser Studie die Reihenfolge der einzelnen Szenen für alle Teilnehmer gleich gehalten. Das hat den Hintergrund, dass insbesondere die Haptik und der direkte Vergleich zur originalen Anwendung im Fokus stehen sollte. So sollen die Probanden zunächst die originale Anwendung mit der Leap Motion kennenlernen und dazu einige Fragen beantworten, um danach den Eindruck durch die Handschuhe besser bewerten zu können.

Für die Umsetzung wurden die Probanden zunächst in einen gesonderten Studienraum gebracht, in welchem sie die originale *ANTARES*-Anwendung kennenlernen konnten. Hier spielten sie die Anwendung mit raucherbezogenen Objekten durch, welche sie entsprechend ihrer farblichen Markierung zuordneten. Dabei stand die Nutzbarkeit im Vordergrund und weniger der psychologische Aufbau dahinter. Dementsprechend konnten die Probanden hier die Interaktion ausgiebig testen. Nach Abschluss der Aufgabe erfolgte die erste Evaluation durch die zuvor benannten Fragebögen. Anschließend wurde dann in einem anderen Studienraum die modifizierte Anwendung mit den Handschuhen getestet. Der Raumwechsel war der Technik geschuldet, die derzeit nur an einem HMD installiert war, wodurch man entschied, die Studie durch diesen Raumwechsel umzusetzen. Nach der Testung der Anwendung mit den haptischen Handschuhen erfolgte dann eine weitere Befragung der Eindrücke der Probanden.

10.6 Ergebnisse

Für diese Studie wurden noch einmal die Probanden der Vergleichsstudie eingeladen. Es wurde erhofft, insbesondere bei den Fragen zu den Handschuhen eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen, da die Nutzer bereits Erfahrungen mit der Technik gemacht hatten und somit die Integration möglicherweise besser bewerten konnten. Dementsprechend nahmen sechs Frauen sowie vier Männer teil, die eine gewisse Technikaffinität besaßen, jedoch bisher unterschiedlich viel Erfahrung im Bereich der Virtual Reality sammeln konnten (0,6) (siehe auch: Kapitel 9.7). Auch hier wurden wegen der kleinen Stichprobengröße der arithmetische Mittelwert und Median in die Bewertung einbezogen.

Immersion und Präsenz nach *igroup*

Die vier unterschiedlichen Kategorien nach *igroup* und die Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle 8 aufgelistet. Hier wird die originale Anwendung mit der Leap Motion (O) der Anwendung mit den Handschuhen (M) gegenüber gestellt.

Kategorie	Generelle Präsenz	Räumliche Präsenz	Involviertheit	Realismus
Leap Motion	2,1 (2)	2,24 (2,5)	0,675 (0,625)	1,025 (1,25)
Manus	2,1 (2)	2,04 (2,4)	0,375 (-0,125)	0,9 (1,25)

Tabelle 8: Mittelwert und (Median) nach *igroup*

Mit Blick auf die Werte lässt sich schnell erkennen, dass die originale Anwendung in allen Kategorien gleich gut oder sogar besser abschneidet als die modifizierte Variante. Die generelle Präsenz wird in beiden Szenarien gleich gut wahrgenommen. Dies passt zu den Ergebnissen der ersten Studie mit der haptischen Weste, wobei sich dort die generelle Präsenz auch kaum durch die Haptik verändert hat.

Die räumliche Präsenz profitiert von der Steuerung der Leap Motion. So scheint die Kamera kaum wahrgenommen zu werden (O:2,7 M:2,1), was sich positiv auf die gesamte Präsenzwertung auswirkt. Die Personen mit den haptischen Handschuhen fühlten sich weniger involviert und konnten die reale Umgebung deutlicher wahrnehmen. Dies könnte zum einen an den Handschuhen liegen, die direkt am Körper getragen werden, aber auch an der realen Umgebung, die unterschiedlich gut gegen äußere Reize wie Lautstärke gedämmt waren. Beide Interaktionsmöglichkeiten wurden gleich realistisch wahrgenommen. So gleicht die Interaktion mit beiden Modellen, der in der Realität.

Immersion und Präsenz nach Stems (Version 2)

Um die Werte des Fragebogens von *igroup* zu ergänzen, wurde zusätzlich der *Presence Questionair* vom Witmer und Singer in der Version 2 nach Stems verwendet. Dieser betrachtet zusätzlich noch weitere Faktoren bei der Bestimmung von Präsenz innerhalb der virtuellen Realität. In der folgenden Tabelle 9 sind die vier Hauptfaktoren sowie die sechs Unterkategorien mit ihrer Durchschnittswertung und Median aufgelistet, die zur Bestimmung der Präsenzfaktoren genutzt werden.

Kategorie	Controll	Sensory	Distraction	Realism	Involvement	Natural	Auditory	Haptics	Resolution	Interface Quality
Leap Motion	2,06 (2,35)	1,75 (2,05)	-1,73 (-1,92)	1,76 (2,14)	2,24 (2,46)	1,73 (1,83)	1,1 (1,5)	1,75 (2,25)	2,15 (2,25)	2,53 (3)
Manus	2,02(2,12)	1,91 (2,14)	-1,48 (-1,67)	1,96 (2,21)	2,13 (2,21)	1,57 (2)	1,7 (2)	2,15 (2,25)	2,35 (3)	2,5 (2,83)

Tabelle 9: Mittelwert und (Median) nach Stems (Version 2)

Auf den ersten Blick scheint es bei den Kontrollfaktoren keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Techniken zu geben. Bei der genauen Betrachtung der einzelnen Fragen wird jedoch deutlich, dass beide Modelle gewisse Vorzüge und Nachteile bieten. So schienen die Nutzer sich durch die haptischen Handschuhe weniger behindernd bei dem Ausführen ihrer Aufgabe zu fühlen (O:1,9 M:2,3) und konnten besser die Reaktion auf ihre Handlungen einschätzen (O:1,7 M:2,5). Dafür werden die von der Kamera getrackten Hände als natürlicher wahrgenommen (O:1,9 M:1,6).

Auf sensorischer Ebene scheinen die haptischen Handschuhe der Leap Motion minimal überlegen. Obwohl sich die Anwendungen nicht unterscheiden, empfanden sich Personen von der Anwendung mit den haptischen Handschuhen auch auditiv mehr einbezogen (O:1 H:1,7). Hier unterschied sich der Wert um 0,7. Zusätzlich gaben die Nutzer an, die Welt mit den haptischen Handschuhen aktiver durch Berührung erkunden/durchsuchen zu können (O:1,4 H: 2), was möglicherweise auf die Haptik zurückzuführen ist.

Die Ablenkungsfaktoren waren bei den Handschuhen um den Wert 0,25 höher eingestuft. Dies passt auch zu den Ergebnissen von *igroup*, da die Handschuhe auch hier deutlicher von den Nutzern wahrgenommen wurden und die reale Umgebung nicht so gut in den Hintergrund treten konnte wie mit der Leap Motion.

Die Realismusbewertung deckt sich jedoch nicht mit der von *igroup*. Zwar wurden die beiden Interaktionsmöglichkeiten auch hier ähnlich bewertet, jedoch deutlich besser als beim Fragebogen zuvor.

Neben den Hauptfaktoren gibt es noch Unterskalen, welche die Faktoren der Präsenz weiter aufschlüsseln. Die Involviertheit wurde in beiden Szenarien ähnlich gut bewertet. Auch hier schien die Steuerung der Handschuhe zu überzeugen, dafür wurden die Personen in der Originalszene mehr in die Szene selbst involviert, wobei die Zeit eher aus den Augen verloren wurde. Hier muss beachtet werden, dass die Personen durch die Reihenfolge, den Ablauf mit der Leap Motion erst kennenlernten und so auch im Schnitt angaben, mehr durch die Anwendung gelernt zu haben als mit den Handschuhen. Wäre eine randomisierte Reihenfolge gewählt worden, könnte dieser Aspekt weniger Einfluss nehmen. Ebenfalls könnte es sein, dass mit den gelernten Inhalten von den Probanden nicht auf die Anwendung abgezielt wird, sondern das Kennenlernen einer neuen Technologie. Da sie die haptischen Handschuhe von *MANUS* bereits kannten, die Leap Motion jedoch nicht, könnte dies die Ergebnisse beeinflussen.

Auch wirkten die Bewegungsabläufe der von der Infrarotkamera aufgezeichneten Hände durchschnittlich etwas natürlicher, was jedoch sehr individuell bewertet wurde. Möglicherweise kann dies auch an den verschiedenen Modellen liegen, die bei der *ANTARES*-Anwendung verwendet werden können. So gibt es unterschiedliche Handmodelle für Frau und Mann in der originalen Anwendung für die Leap Motion, die ebenfalls einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Nutzers nehmen könnten.

Wie zuvor angesprochen, wurden die Probanden in der modifizierten Szene akustisch mehr einbezogen. Daher ist auch die Wertung des auditiven Eindrucks mit 1,7 um 0,6 höher als bei der originalen Anwendung. Ob dies womöglich damit zu tun hat, dass zwischen den beiden Testungen der Raum und auch der genutzte Rechner gewechselt wurde, konnte jedoch nicht herausgefunden werden.

Wie erhofft, wurde der haptische Eindruck der modifizierten Anwendung durchschnittlich etwas besser bewertet (O:1,75 M: 2,15).

Möglicherweise hatte die Haptik auch Einfluss auf die Bewertung der Auflösung. Diese beschäftigt sich mit Fragen, wie gut Objekte untersucht werden konnten. Auch hier war die modifizierte Anwendung besser bewertet.

Das Interface, also die verwendeten *HTC VIVE PRO* HMDs wurden beide Szenarien dafür sehr ähnlich bewertet, was dafür sprechen könnte, dass der akustische Eindruck davon nicht beeinflusst wurde. Dementsprechend gab es hier keine messbaren Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Setups, was dafür spricht, dass die Bewertungen nicht durch die Qualität der unterschiedlichen Rechner und Brillen beeinflusst wurden.

Insgesamt scheinen nach diesen Ergebnissen beide Interaktionsgeräte gewisse Vorteile zu bieten, die sich gegeneinander auszugleichen scheinen.

Bewertung der Haptik nach dem Fragebogen von Cappello et al.

Da die originale Anwendung kein haptisches Feedback zum Vergleich besitzt, wurde sich ab diesem Fragebogen dazu entschieden, die Ergebnisse der *ANTARES*-Einbindung mit den Handschuhen von *MANUS* (AM) mit den Ergebnissen der Vergleichsstudie 9.7 (M) abzugleichen. In der folgenden Tabelle 10 sind die Ergebnisse der einzelnen Fragen gegenüber gestellt worden:

Frage:	Manus	Antares + Manus
1. Wie gut konnten Sie sich auf das haptische Feedback verlassen?	1,1 (1,5)	1,5 (2)
2. Wie gut konnten Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?	2 (2)	2,5 (3)
3. Wie realistisch war das haptische Feedback?	0,7 (1)	1,2 (2)
4. Wie sehr haben das haptische und visuelle Feedback übereingestimmt?	1,2 (1,5)	2,2 (2,5)
5. Wie gut konnte das haptische Gerät gesteuert werden?	1,6 (2)	2 (2)
6. Wie gut empfanden Sie die Erfahrung insgesamt?	1,8 (2)	2,4 (2,5)
7. Wie sicher fühlten sie sich mit dem haptischen Feedback?	1,3 (2)	2,2 (2)
8. Wie gut konnten Sie die gestellte Aufgabe erfüllen?	2,1 (2)	2,9 (3)

Tabelle 10: Mittelwert und (Median) der Manus Handschuhe nach Cappello et al. der Vergleichsstudie gegenüber der Antaresmodifikation

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass sich durch die Veränderung der Anwendung auch die Wirkung der Handschuhe auf die Nutzer verändert zu haben scheint. So schneiden die Manus Prime X Haptic VR in der *ANTARES*-Modifikation in fast allen Kategorien deutlich besser ab als noch in der Vergleichsstudie. Dafür kann es unterschiedliche Gründe geben. Nicht nur wurde die Anwendung insgesamt besser wahrgenommen, was die Wertung beeinflussen könnte, sondern auch das haptische Feedback konnte mehr überzeugen. Möglicherweise liegt das daran, dass in diesem Fall Haptik gegenüber das Fernbleiben von Haptik getestet wurde und in der Vergleichsstudie vibrotaktiler Feedback gegenüber Force Feedback. Ebenfalls scheint die Steuerung und die Übereinstimmung von visuellen und haptischen Reiz in *ANTARES* höher eingeschätzt. Möglicherweise kommt den Handschuhen hier auch die Aufgabenstellung zugute, da, wie zuvor erhoben, diese haptischen Handschuhe im Speziellen für das Greifen und Bewegen von Objekten eignen. Da genau diese Kompetenz beim AAT benötigt wird, werden diese Aspekte möglicherweise besser wahrgenommen. Einzig und allein die Steuerung der Handschuhe und die Sicherheit, welche das haptische Feedback vermittelt, wurde beim Betrachten des Medians gleich gut bewertet, wobei auch hier in der durchschnittlichen Betrachtung die Werte deutlich auseinander gehen (siehe Frage 5 und 7).

Evaluation durch eigene Fragen

Abschließend wurden die Handschuhe noch einmal durch die eigenen Fragen aus der Vergleichsstudie 9.7 evaluiert, die zur Ergänzung von Cappello et al. dienen. Einige Fragen, die sich spezifisch auf die Vergleichsanwendung fokussierten, wurden an dieser Stelle entfernt. Anschließend wurden sie in der folgenden Tabelle 11 gegeneinandergestellt:

Frage:	Manus	Antares + Manus
1. Die Handschuhe waren angenehm zu tragen.	2,4 (3)	2,1 (3)
2. Bei der Kalibrierung der Handschuhe hatte ich Probleme.	-1,8 (-2)	-1,1 (-3)
3. Die Handschuhe waren zu schwer.	-2,3 (-3)	-2,3 (-2,5)
4. In der virtuellen Realität wirkten meine Hände gut repräsentiert.	1,5 (1,5)	2,3 (2,5)
5. Die Bewegung meiner Hände wurde ohne Verzögerung in die VR übertragen.	0,8 (1,5)	2,3 (3)
9. Das Greifen der Objekte fiel mir leicht.	2,3 (3)	2,4 (3)
10. Das haptische Feedback hat funktioniert.	1,9 (2)	2,2 (2,5)
11. Das haptische Feedback half mir beim Greifen.	1,2 (1,5)	1,5 (2)
12. Das haptische Feedback fühlte sich realistisch an.	1,4 (1,5)	1,1 (1,5)
13. Ich hatte Angst die Handschuhe zu beschädigen.	-1,3 (-2,5)	-1,6 (-2,5)

Tabelle 11: Mittelwert und (Median) der eigenen Fragen

Der Komfort der Handschuhe (Frage 1 und 3) wurde in der *ANTARES*-Studie etwas schlechter bewertet. Da hier die Handschuhe gegenüber dem kamerabasierten System getestet wurde, welches bereits ausgehend von den anderen Fragen als komfortabler eingestuft wurde, lässt sich dieser Unterschied erklären. So scheinen die Manus Prime X Haptik etwas unkomfortabler als die Leap Motion und komfortabler als die SenseGlove Nova.

Die Kalibrierung war erneut sehr unterschiedlich eingestuft worden. So scheint es hier zu Problemen gekommen zu sein, wobei diese sich auf Einzelfälle zurückführen lassen (M:-2 AM:-3).

Die Repräsentation der Hände und die Verzögerung der Bewegungen wurde trotz des Vergleichs mit der Leap Motion in der AAT-Anwendung deutlich besser wahrgenommen als noch in der Vergleichsanwendung. Ein möglicher Grund könnte, wie bereits bei Capello et al. angesprochen, die Aufgabenstellung bei *ANTARES* sein. Da die Sortieraufgabe den Handschuhen zugutekommt (3), fallen möglicherweise Verzögerungen oder eine fehlerhafte Repräsentation nicht so stark auf als beim Formen von Gesten. Zusätzlich konnte die vibrotaktile Haptik etwas mehr unterstützen als noch in der Vergleichsanwendung. Womöglich, da im zweiten Fall gegen eine Technik ohne Haptik getestet wurde.

10.6.1 Zusammenfassung

Die Einbindung der haptischen Handschuhe Manus Prime X Haptic VR in die bestehende und bereits evaluierte VR Suchtentwöhnungstherapie *ANTARES* konnte einige bisher angenommene Theorien weiter festigen, aber auch neue Tendenzen geben.

Auch wenn die Anwendung nicht selbst implementiert wurde, so konnte die Einbindung der Manus Prime X Haptic VR in das bestehende Programm in wenigen Stunden umgesetzt werden. Dies zeigt, dass die angenommene Komplexität der Einbindung mit den eigenen Erfahrungen übereinstimmen. Auch war die Kalibrierung gut bewertet, was dafür spricht, dass sie trotz der etwas höheren Komplexität zu den SenseGlove Nova gut von den Anwendern umgesetzt werden konnte.

Die Auswertung der Immersion und Präsenz innerhalb beider Anwendungen zeigt auf, dass beide Techniken gewisse Vor- und Nachteile mitbringen, durch welche sie die Präsenz beeinflussen. Die Leap Motion scheint durch das kamerabasierte Tracking der Hände für sehr natürliche Darstellungen der Bewegung zu sorgen. Dementsprechend wurde auch die Interaktion als natürlicher wahrgenommen und profitierte davon, dass das Eingabegerät nicht direkt an der Person angebracht war. Insgesamt führte dies zu einer höheren Involviertheit in der Anwendung gegenüber den Manus Prime X Haptic VR. Dieses Ergebnis ist anders als noch bei der haptischen Weste, die insbesondere dort die Präsenz positiv beeinflussen konnte.

Jedoch fühlten sich die Probanden bei der kamerabasierten Interaktion etwas mehr behindert als mit den haptischen Handschuhen. Das kann durch den Faktor kommen, dass die Hände verschwinden, sollten sie nicht erfasst werden können oder überlappen. Beide Faktoren sind wichtig für eine überzeugende Darstellung in einer virtuellen Welt. Da die Werte in den meisten Fällen jedoch recht nahe beieinander lagen, scheinen beide Technologien insgesamt eine ähnliche Präsenz hervorrufen zu können.

Die Frage nach dem Realismus ist hier besonders komplex. Zwar lagen in beiden Präsenzfragebögen die Werte auch hier nahe beieinander und konnten beide von der realitätsnahen Steuerung profitieren, jedoch sind die Werte bei *igroup* etwa um eins niedriger. So scheint die reale Umgebung insgesamt über alle Befragungen hinweg immer noch im Hintergrund wahrgenommen zu werden. Dies könnte an den Studienbedingungen liegen. So waren die Räumlichkeiten nicht optimal akustisch gedämmt und Probanden wurden in vereinzelt Fällen vom Testleiter verbal angeleitet, sofern es zu Nachfragen kam.

Dennoch scheint die virtuelle Umgebung und auch die Interaktion nach Stems (Version 2)

durch die haptischen Handschuhe verbessert worden zu sein. Insbesondere das haptische Feedback und die etwas weniger einschränkende Technik wirkte hier positiv auf die Anwendung ein. Dennoch scheint die haptische Wirkung durch das vibrotaktile Feedback noch nicht ausreichend realistisch. Hier gingen die Eindrücke der Studienteilnehmer deutlich auseinander. Dies schien dennoch bei der Sortieraufgabe unterstützt zu haben, wodurch insgesamt die Erfüllbarkeit besser bewertet wurde.

Auch die Wirkung der haptischen Handschuhe bezogen auf die beiden Anwendungen, in welcher sie integriert wurden, war sehr unterschiedlich. Die Bewertungen der haptischen Technik waren bei der Integration von *ANTARES* in den meisten Fällen deutlich besser als in der Vergleichsanwendung. Selbst Aspekte wie die Verlässlichkeit des haptisches Feedbacks, die keinen signifikanten Unterschied in beiden Anwendungen haben sollte, wirkte unterschiedlich auf die Testpersonen. Einzig und alleine das haptische Feedback wurde in der ersten Studie von einigen Teilnehmern etwas realistischer eingestuft. Dies könnte daran liegen, dass die Objekte, die dort gezeigt wurden, physisch stärkere Unterschiede aufgewiesen haben als die in der Suchtentwöhnungsanwendung. Dort waren alle Objekte statisch und es gab keine Unterschiede zwischen harten und weichen Objekten. Auch könnte die fehlende Option, Objekte zu werfen, Einfluss auf die haptische Wahrnehmung genommen haben.

10.6.2 Fazit

Insgesamt lässt sich die Ergänzung von *ANTARES* mit den haptischen Handschuhen, zumindest bezogen auf die kleine Testgruppe, als Erfolg einstufen. Die Personen konnten die gestellte Aufgabe, die bei der Suchtentwöhnung intuitiv ablaufen muss, ohne Probleme lösen und gaben hier fast die Maximalpunktzahl (2,9 von 3). Über die Fragebögen hinweg scheinen die haptischen Handschuhe nicht zu einer Einschränkung geführt zu haben und konnten in einigen Bereichen sogar die Anwendung sinnvoll ergänzen. Jedoch scheint das vibrotaktile Feedback, auch wenn es beim Lösen der Aufgaben für einige unterstützend wirkte, nicht realistisch genug.

Zusammenfassend scheinen die haptischen Handschuhe zwar das Problem des Trackings der Leap Motion auszugleichen und dementsprechend weniger einschränkend eingestuft zu werden, jedoch sind die kamerabasierten Methoden beim Übertragen der Bewegungen derzeit natürlicher und überzeugen dadurch, dass sie nicht am Körper getragen werden müssen. Eine Lösung, um die Präsenz mit den Handschuhen zu verbessern, wäre an den Algorithmen der Darstellung zu arbeiten. Sofern die Bewegungen verlässlicher übertragen würden, würde auch die Wirkung der Handschuhe deutlich profitieren. Ebenfalls könnte eine Passung der Handschuhgröße hier hilfreich sein. Womöglich bedarf es noch Anpassungen an die Handgrößen. Eine andere Möglichkeit wäre es, die beiden Techniken zu kombinieren. Dementsprechend das Tracking mit einer Infrarotkamera zu erweitern. Somit könnte eine detaillierte Darstellung der Hände im Sichtfeld gewährleistet werden. Zusätzlich wäre es sinnvoll, den Objekten das entsprechende Skript zum Werfen zuzuweisen, damit die Objekte sich genauso wie mit der *Leap Motion* verhalten. Auch wenn dadurch die Nutzbarkeit verschlechtert werden könnte, wäre dieses Verhalten deutlich glaubwürdiger, was ebenfalls der Präsenz zugutekommen würde.

Gesamtheitlich scheinen beide Techniken eine gute Möglichkeit, die Aufgaben des AAT zu lösen. In fast allen Bereichen gleichen sich die Faktoren gegenseitig aus, wodurch nicht genau gesagt werden kann, welche Technik sich besser eignet. Sollte aber die Darstellung der *Manus* Handschuhe verbessert werden und könnte die reale Welt etwas deutlicher in den Hintergrund rücken, so könnte die Haptik der entscheidende Vorteil werden, der die Nutzer beim intuitiven Sortieren unterstützt.

11 Einbindung haptischer Handschuhe in den BAT

11.1 Einleitung

Das letzte hier vorgestellte Projekt war in seiner ursprünglichen Form die erste Anwendung, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. Der erste Schritt des selbst erstellten Konzepts beschäftigte sich mit der Einarbeitung in das Thema Haptik durch bereits etablierte Technologie. Dazu wurde das zum *HTC VIVE Pro* HMD zugehörige Interaktionsmedium, der *HTC VIVE Pro* Controller verwendet. Dieser bietet die Möglichkeit, die integrierten Vibrationsmotoren anzusprechen und diese für individualisierte Haptik zu nutzen.

In der Kooperation mit dem Lehrstuhl der klinischen Psychologie und Psychotherapie der Universität Siegen unter der Leitung von Prof. Dr. Tim Klucken, wurde diese Technik bei der Übersetzung eines psychologischen Tests des Behavioral Approach Test (BAT) genutzt, um den Ablauf in die virtuelle Welt zu übertragen. Dieser wird derzeit mit dem realen Ablauf in einer ersten Studie verglichen, die jedoch noch nicht abgeschlossen ist (Stand: 08.23).

Die daraus entstandene VR-Anwendung, die im Folgenden vorgestellt wird, wurde abschließend auch für die Integration einer weiteren haptischen Technologie genutzt. So wurde entschieden, die Ergebnisse entsprechend der Manus Prime X Haptic VR nun auch für die SenseGlove Nova in einer Anwendung mit therapeutischem Hintergrund zu prüfen. Dadurch entstand die Idee, die Handschuhe von *SenseGlove* in diesen psychologischen Test einzubinden und die Wirkung auf die Nutzer zu untersuchen. Zusätzlich ermöglicht die Technik der SenseGlove Nova, eine realitätsnähere Umsetzung der ursprünglichen BAT-Anwendung durch das Force Feedback.

11.2 HTC Controller

Controller mit vibrotaktilen Feedback sind bereits seit Jahren etabliert. Die wohl bekanntesten ersten Steuerungseinheiten mit Vibration war das *Rumblepack* [219] der *Nintendo64* und der *DualShock*-Controller [214] der *Playstation*, die Ende der 90er Jahre in Japan erschienen sind. Bis heute hält sich diese Art der haptischen Technologie und wird auch von den derzeit auf dem Markt befindlichen VR-Geräten unterstützt. Für diese Arbeit stand, wie zuvor erwähnt, die *HTC VIVE Pro* mit dem zugehörigen *HTC VIVE Pro* Controller [50, 341] zur Verfügung. Dieser Controller ist das etablierte Steuerungselement der *HTC VIVE Pro* und ermöglicht die Interaktion mit der virtuellen Umgebung. Sie sind kompatibel mit dem Lighthouse-System der *HTC VIVE*, wodurch das Tracking der Controller im VR-Raum ermöglicht wird. Zusätzlich besitzt der Controller vibrotaktile Motoren, dessen Feedback die Firma selbst als *HD-haptische Rückmeldung* bezeichnet. Darüber hinaus besitzt der Controller sechs verschiedene Knöpfe, die je nach Bedarf für die Anwendung zugewiesen werden können (siehe Bild: 31).

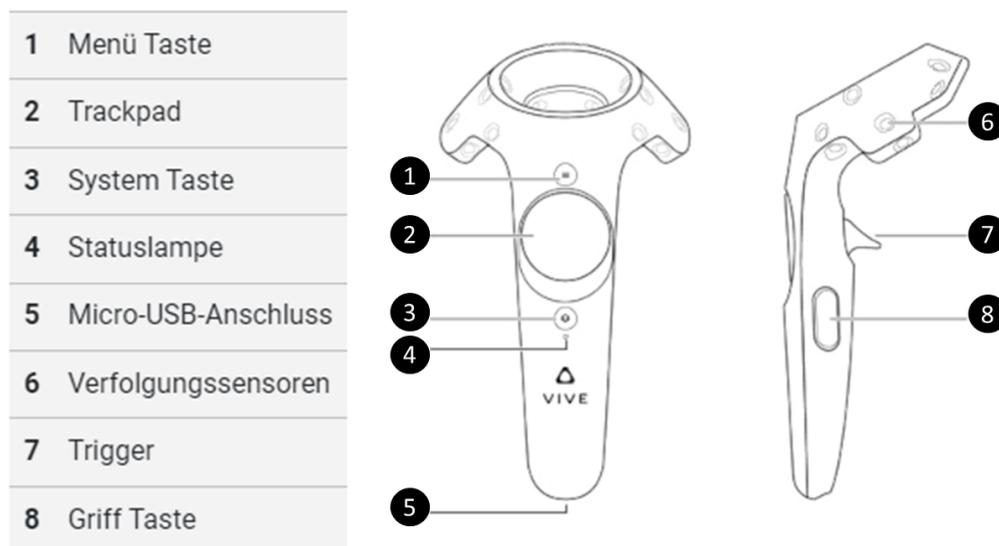


Abbildung 31: *HTC VIVE Pro* Controller [342]

Die Verfügbarkeit, die Integrationsmöglichkeit in *Unity*, sowie die Individualisierungsfunktionen des etablierten *HTC VIVE* Controllers boten einen guten ersten Einstiegspunkt in die Arbeit mit haptischer Technologie. So konnten bereits Erfahrungen mit dem Konzipieren und von Vibrationsmustern, sowie der sinnvollen Einbindung dieser in eine VR-Anwendung gesammelt werden.

11.3 Forschungsansatz

Wie bereits im Kapitel 4.3.1 Angststörungen beschrieben, leiden ca. 5% aller Deutschen unter der Angst vor Spinnen. Leider sind therapeutische Ansätze wie die Exposition und der BAT im Realen daran gebunden, einen Zugang zu einer lebendigen Spinne zu haben, was mit Haltungsaufwand, Kosten und womöglichen Stress des Tiers einhergeht. Daher bestand die Idee, den BAT-Ansatz in die virtuelle Realität zu übertragen. Dieser psychologische Test dient dazu, Angst und Vermeidungsverhalten in bestimmten Situationen messen und beurteilen zu können. Hierbei werden die Patienten angehalten, sich dem angstausslösenden Reiz so weit zu nähern, bis sie selbst ihre Grenze gefunden haben und nicht weiter gehen können oder wollen. Häufig sind dabei Fluchtstrategien zu beobachten. Der Stress, der durch die Angst ausgelöst wird, kann zu physiologischen Änderungen führen [262]. Darüber hinaus ist es üblich, bei diesem Verfahren die aktuelle Angst des Teilnehmers basierend auf der Distanz zum angstausslösenden Reiz zu erfragen. Somit ist es möglich, den Verlauf der Angst genau zu dokumentieren. In der virtuellen Realität können diese Angstwerte mit einem detaillierten Abstandswert zu dem angstausslösenden Reiz aufgezeichnet werden, was mögliche Vorteile bieten kann. Die Idee, den BAT in die virtuelle Realität zu übertragen, gibt es bereits seit 2008, wobei Mühlberger et al. [211] einen ersten Versuch mit positiven Ergebnissen starteten, jedoch keinen Vergleich zum realen BAT aufzeigten. Aus diesem Grund wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, welcher den realen Ablauf in die VR überträgt und beide Verfahren vergleicht. Dazu wurden die Abläufe vereinheitlicht und in mehreren Entwicklungsphasen aneinander angeglichen.

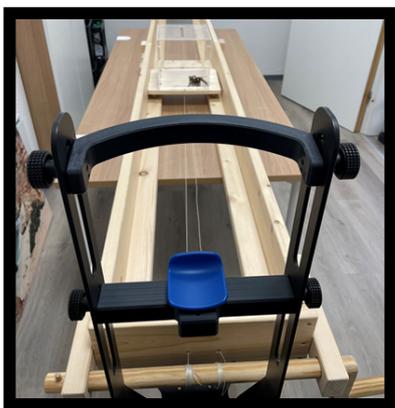


Abbildung 32: Aufbau der Kurbelkonstruktion des realen Behavioral Approach: Kinnstütze (links), Sicht des Nutzers (rechts)

11.3.1 Ablauf des Kurbel-BAT

Insgesamt wurden zwei Szenarien entworfen. Zum einen der sogenannte „Kurbel“-BAT, bei welchem die Annäherung durch das Herankurbeln des angstausslösenden Reizes, in diesem Fall eine Plexiglasbox mit einer Spinne, umgesetzt wurde. Dazu wurde in der Realität ein großes Kurbelkonstrukt gebaut (siehe Abbildung 32). Dieses wurde in der virtuellen Controller-Anwendung über ein Touchsystem umgesetzt, wobei die Phobiker nur noch den Finger auf den unteren Rand des Touchfeldes des Controllers halten müssen, um die Spinne „heranzukurbeln“. Der Ablauf des gesamten Szenarios wird im folgenden einmal kurz erläutert:

- Schritt 1: Erfassen des ersten Angstratings vor dem BAT.
- Schritt 2: Erklärung des Ablaufs und Ankündigen der Spinne. Anschließende Erhebung des zweiten Angstratings.
- Schritt 3: Holen der Spinne und an der Türschwelle warten. Erheben des dritten Angstratings.
- Schritt 3: Box auf der Kurbelkonstruktion platzieren und Erheben des vierten Angstratings.
- Schritt 4: Nachdem die Spinne 25% heran gekurbelt wurde. Erheben des fünften Angstratings.
- Schritt 5: Nachdem die Spinne 50% heran gekurbelt wurde. Erheben des sechsten Angstratings.
- Schritt 6: Nachdem die Spinne 75% heran gekurbelt wurde. Erheben des siebten Angstratings.
- Schritt 7: Spinne hat die maximale Position erreicht und befindet sich nun direkt bei dem Patienten. Ausmessen und notieren der finalen Distanz. Erheben des achten Angstratings.
- Schritt 8: Spinne aus dem Raum bringen. Erheben des neunten Angstratings.

Auf das zweite Szenario, den sogenannten „Lauf“-BAT, bei dem sich die Person durch Laufen annähert, wird hier nicht näher eingegangen. Dieser wurde nicht mit den haptischen Handschuhen umgesetzt und ist daher nicht relevant für die Ergebnisse der in dieser Arbeit besprochenen Forschungsfragen.

11.4 Konzept

Um die Vorteile des Controllers zu nutzen, wurde bei der zuerst konzipierten VR-BAT-Anwendung auf eine Vereinfachung der Steuerung gesetzt, um den Fokus der Nutzer möglichst auf dem angstauslösenden Reiz zu legen. Dadurch wurde die Annäherung der Spinne über das Trackpad per Touch realisiert und nicht wie in der Realität über eine Kurbel. Um den Nutzern dennoch ein vergleichbares Gefühl zu geben, wird ein haptisches Feedback über das Trackpad ausgelöst, welches das Gefühl der Kurbel imitieren soll.

Zwar konnte durch eine Vorauswertung bereits erhoben werden, dass die Steuerung gut für die meisten Probanden funktioniert hat, jedoch entsprach dieser Aspekt nicht mehr dem realen Ablauf. Um eine vergleichbare Interaktion glaubhaft in die virtuelle Welt zu bringen, kann haptische Technologie, wie die der SenseGlove Nova genutzt werden. Durch den vorherigen Vergleich der Technologien konnte bereits festgestellt werden, dass die haptischen Handschuhe sich für den Einsatz in der virtuellen Welt eignen und im Grundsatz auch für den Gebrauch in der Therapie vorstellbar wären. Durch den haptischen Eindruck des Force Feedback wäre es möglich, die Kurbel durch einen realen Widerstand „berührbar“ zu machen und somit die Interaktion ähnlich zu der in der Realität zu gestalten. Dadurch könnte ein zusätzlicher Mehrwert geschaffen werden, der in einer ersten Testphase geprüft werden müsste. Ebenfalls wäre ein Vergleich zu der Controllersteuerung wichtig, um auch mögliche Nachteile zu erheben.

11.5 Programmiertechnische Umsetzung

Nachdem die Konzepte genau definiert waren, wurde mit der Umsetzung der Integration begonnen. Hierzu wurde wie bei allen Projekten dieser Arbeit die Entwicklungsumgebung *Unity* genutzt. Zunächst wurde auf der Version 2019.3.15f1 entwickelt und anschließend auf die Version 2021.3.2f1 geupgradet. Diese Entscheidung wurde aufgrund von Performance und Ambient Occlusion Problemen getroffen, welche sich negativ auf den visuellen Eindruck auswirkten. Primär wurde auf einem Laptop mit einem Intel i9 Prozessor und einer *NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU* gearbeitet, auf welchem für die *HTC VIVE Pro* [135] entwickelt wurde.

Ablauf des implementierten VR-Kurbel-BAT

Zur Implementation des VR-Kurbel-BAT wurde der vorgestellte Verlauf aus Abschnitt 11.3.1 nachempfunden. Hierzu wurde ein *Manager*-Skript erstellt, welches die einzelnen Schritte nacheinander durchgeht und entsprechend die Methoden, die zu den Schritten gehören, ausführt. Der gesamte Ablauf konnte hierbei über die Abfragen des Angstmeters und die Annäherung zur Spinnenbox realisiert werden.

- Schritt 1: Zu Beginn der Anwendung starten die Nutzer vor einem Tisch gegenüber einer Tür. Der Nutzer wird angehalten, das erste Angstrating über den Controller innerhalb der Anwendung auszufüllen.
- Schritt 2: Sobald das Angstrating abgegeben wurde, öffnet sich die Tür automatisch. Der virtuelle Testleiter betritt den Raum und erläutert den folgenden Ablauf. Die Animationsphasen wurden hier mit dem Audio synchronisiert. Anschließend kündigt der Testleiter das Holen der Spinne an und fordert den Nutzer auf, das zweite Angstrating auszufüllen.
- Schritt 3: Nach dem Ausfüllen des Angstrating verlässt der Testleiter den Raum. Mit einer kurzen Wartezeit von 20 Sekunden öffnet sich die Tür erneut und der Testleiter steht mit der Box, in der sich die Spinne befindet, an der Türschwelle. Das dritte Angstrating wird erfragt.
- Schritt 4-7: Nach dem Ausfüllen des dritten Angstratings geht der Testleiter auf den Tisch zu und setzt die Box dort ab. Nach einer letzten Erklärung verlässt er den Raum und die nun folgenden Angstabfragen hängen von der Distanz zwischen Box und Nutzer ab. Ab diesem Punkt kann der Anwender die Distanz wie besprochen durch das Trackpad des Controllers reduzieren. Sind 25% des Weges geschafft, erscheint das nächste Angstrating usw.
- Schritt 8: Sobald der Anwender nicht mehr weiter machen möchte oder kann oder die 100% des Weges abgeschlossen sind, kann der reale Testleiter, der während des Ablaufs anwesend ist und alles prüft, auf der Bildschirmansicht der Anwendung einen Button „Beenden“ drücken. Dies wurde so implementiert, damit der Testleiter die Möglichkeit hat, die Person aus der Angstsituation zu holen. Anschließend wird ein Angstrating an der finalen Position erfasst und abgespeichert. Im letzten Schritt verschwindet die Spinne vom Tisch und das allerletzte Angstrating erfolgt, welches zum automatischen Schließen der Anwendung führt.

Raumdesign

Das Raumdesign wurde an einen schlichten Konferenzraum angelehnt, da diese vorzugsweise lange Tische nutzen und dies den Realismus der Szene unterstützt. Wie bereits in den anderen Anwendungen wurden kostenlose Modelle von Webseiten wie TurboSquid [340] und CGTrader [39] verwendet, um den Raum auszustatten.

Bei der Controlleranwendung wurde bewusst auf die Kurbelkonstruktion im Raum verzichtet, die im realen Raum zu sehen ist (siehe Abbildung 32). Da diese nicht verwendet wird und Aspekte wie eine Kinnstütze das Sichtfeld einschränken könnten, hat man an dieser Stelle davon abgesehen. Ebenfalls wurde erhofft, die Glaubwürdigkeit der Anwendung durch das Weglassen eines solchen Konstrukts zu verbessern. So entstand der virtuelle Raum, der in Abbildung 33 zu sehen ist.



Abbildung 33: Darstellung des Kurbel-BAT Raums in VR

Bei der Integration der SenseGlove Nova mussten einige Anpassungen gemacht werden. So wurde anders als zuvor eine selbst modellierte Kurbel in das Szenendesign übernommen. Um dennoch von den Vorteilen der virtuellen Welt zu profitieren, wurde sie weniger sperrig integriert und nimmt kaum Einfluss auf das Sichtfeld des Nutzers. Zusätzlich wurden Knöpfe an den Tisch gesetzt, welche die Controller-Knöpfe ersetzten. Sie wurden in Abbildung 34 rot umkreist. Dadurch kann die Programmstruktur beim Angeben der Angst von der Ursprungsanwendung übernommen werden. Zusätzlich wurden einigen Objekten das *SG_Material*-Skript zugewiesen, um für die benötigte Haptik zu sorgen. Dementsprechend sind Gegenstände wie die Tischplatte, die Plexiglasbox und die Kurbel durch das Force Feedback wahrzunehmen. Abschließend wurde die Bodentextur und Belichtung minimal angepasst (siehe: Abbildung 34).



Abbildung 34: Darstellung des erweiterten Kurbel-BAT Raums in VR

Verhalten der Spinne

Bei dieser Anwendung wurde ein anderes Spinnenmodell genutzt als bei der Testung des TESLASUIT. Hierzu wurde das Asset „Tarantula Animated“ von WDallgraphics [366] verwendet. Dieses Modell passte am besten zu der Spinnenart, die im realen BAT verwendet wurde und konnte dementsprechend einen möglichst ähnlichen Eindruck vermitteln. Zusätzlich wurden auch bei diesem Asset bereits einige Animationen zur Verfügung gestellt, die für eine Bewegung der Spinne innerhalb der Plexiglasbox verwendet wurden. Da die Box sich bewegt, wurde auf das Bewegungsskript der TESLASUIT-Anwendung (7.5) zurückgegriffen. So werden unterschiedliche Punkte nahe der vorderen Kante der Box abgelaufen, damit die Spinne etwas lebendiger wirkt.

Nutzung des vibrotaktilen Feedbacks der HTC VIVE Controller über SteamVR

Das *SteamVR*-Plugin [312] ermöglicht es neben der Verwendung eines *HTC VIVE* HMDs, auch die Vibrationsmotoren des *HTC VIVE* und *HTC VIVE Pro* Controllers anzusprechen. Standardmäßig sind jedem Spieler zwei Controller zugewiesen. Um das vibrotaktile Feedback des Controllers nutzen zu können, wird die Methode *SteamVR_Actions.default_Haptic* von der Klasse */SteamVR_Actions_Vibration/* genutzt. Ein fertiges Beispiel könnte wie folgt ausschauen:

```
SteamVR_Actions.default_Haptic[SteamVR_Input_Sources.RightHand].Execute(0f, 0.5f, 6, 0.5f);
```

Der erste Wert gibt die Verzögerung an, bis die Vibration startet. Der zweite Wert, gibt an, wie lange die Vibration anhält und die letzten beiden Werte entsprechen der Frequenz und der Amplitude, die das Gefühl der Vibration steuern. Aus diesen Werten entsteht

dann die entsprechende Vibration, die durch Anpassung der Werte sehr unterschiedlich wirken kann. Dadurch entsteht die Möglichkeit, viel des bisher angesprochenen Feedbacks selbst zu erstellen und an die passenden Stellen der Interaktion zu integrieren.

Umsetzung der Annäherung

Wie zuvor beschrieben, wurde für die Annäherung mit dem Controller das Trackpad verwendet. Durch das Berühren des Touchpads am unteren Rand schiebt sich die Box mit der Spinne über den Tisch. Dazu wird aus Position des Fingers in Relation zur Mitte des Trackpads ein Zahlenwert errechnet, der anschließend auf die Position der Box angerechnet wird.

Dieser Vorgang sollte nun auch mit einer virtuellen Kurbel umgesetzt werden. Zunächst musste in einem ersten Schritt das Verhalten der Kurbel in die virtuelle Welt gebracht werden. Dementsprechend eine Rotation um die eigene Achse. Zunächst wurde dafür ein Modell selbst modelliert, welches dann mit einem *Hinge Joint*, einem Fixierungspunkt und einem *RigidBody* (siehe auch Kapitel 3.3.3) versehen wurde, um die Kurbel nachzubilden. Zwar konnte so die Reaktion der Kurbel imitiert werden, jedoch erwies sich die Interaktion mit den Handschuhen als herausfordernd. Mit den von *SenseGlove* bereitgestellten Skripten war die Kurbel zwar greifbar, aber wenn die Handschuhe sich der Kurbel unterordneten, konnte diese nicht bewegt werden. Ordnete sich die Kurbel den Handschuhen unter, wurde das komplette Modell der Kurbel verzogen, wodurch die Kurbel nicht mehr nutzbar war. Am Ende wurde sich dazu entschieden, der Kurbel kein solches Skript mitzugeben. Zwar kann die Hand so auch nicht perfekt an dem Griff haften, jedoch erzielte dies die besten Ergebnisse einer Kurbelinteraktion.

Um die Drehung der Kurbel über das *Hinge Joint* nun in die Bewegung der Spinne samt Plexiglasbox umzusetzen, wurde die Veränderung des Winkels bei der Drehung der Kurbel genutzt. Demnach wurde für jeden Frame immer ein Winkel gespeichert, der dann mit dem neuen Winkel aus dem nächsten Frame verglichen wurde. Sollte der neue Winkel größer sein als der alte Winkel, wird die Plexiglasbox auf der z-Achse entsprechend der Veränderung zwischen den beiden Winkel verschoben. Wenn die Kurbel sich einmal um 360 Grad gedreht hat, gab es einen Sonderfall. Denn sobald dies geschieht, ist der aktuelle Winkel kleiner als der vorher berechnete Winkel. Aus diesem Grund wurde durch eine zusätzliche Abfrage geprüft, ob dieser Fall zutrifft. Wenn dies der Fall war, wurde die Veränderung zwischen den Winkeln um den Wert 360 angepasst.

Abfrage der Angst

Die Erfassung der Angst während des BAT-Ablaufs ermöglicht einen detaillierten Selbsteindruck der Probanden. Üblicherweise wird dieser verbal von den Patienten erhoben. Eine digitale Spracherkennung ist durchaus möglich, jedoch nicht immer robust. Aus diesem Grund wurde entschieden, einen Schieberegler in das Programm einzubetten, welcher eine Skala von 0 bis 100 (0 = keine Angst, 100 = extreme Angst) besitzt, auf welchem die Probanden ihre Angst angeben können. Über die implementierte Methode *askForFear()* wird an den richtigen Stellen im Programm die Angst erfasst. Sobald diese Methode startet, erscheint der Schieberegler, welcher dann entweder über den Controller oder über Knöpfe am Tisch mit den Handschuhen entsprechend hoch- und heruntergestellt werden kann, um die aktuelle Angst anzugeben. Die Angabe muss dann von den Nutzern zusätzlich bestätigt werden, wodurch das Programm entsprechend die Eingaben speichert und mit dem Ablauf fortfährt.

Abstandsberechnung

Neben der Angabe der aktuellen Angst ist die Abstandsmessung von besonderer Bedeutung beim BAT. Diese gibt an, wie schnell und weit sich ein Proband an den angstauslösenden Reiz annähert und wie diese Annäherung mit den angegebenen Angstwerten in Relation steht. Üblicherweise wird im in-vivo BAT nur die Endposition erfasst. Im Programm ist jedoch eine detaillierte Aufzeichnung des Verlaufs dieser Distanzminderung aufzuzeichnen. So können die Distanzen den Angstwerten und auch anderen gemessenen Daten zugeordnet werden. Darunter auch physiologische Daten, die während der Studie erfasst werden können.

Um diese Distanzmessung zu implementieren, wurde das *DistanceToObject*-Skript erstellt, welches der Plexiglasbox mit der Spinne zugewiesen wurde und jeden Frame den Abstand misst. Dazu werden die Abstände zum Kopf, den Händen sowie der Endposition zur Box berücksichtigt, ohne dabei den Y-Achsenwert zu betrachten. Da die Höhe bzw. Größe der Person keine Relevanz zur Distanzmessung hat, wurde dieser Wert vernachlässigt. Die Werte werden jede Sekunde aufgezeichnet und abgespeichert.

Beenden des Programms und Ausschreiben der Daten

Nachdem der Patient angibt, die finale Position erreicht zu haben, muss der Testleiter einen „Beenden“-Knopf auf seinem Bildschirm betätigen. Dadurch startet eine verschachtelte Abfrage, welche dafür sorgt, dass eine Angstabfrage an dieser finalen Position erfolgt und die Distanz gespeichert wird. In einem letzten Schritt verschwindet die Box mit der Spinne und ein finaler Angstwert wird erhoben. Anschließend werden alle temporär gespeicherten Daten in eine CSV Datei ausgeschrieben. Sobald das Ausschreiben abgeschlossen wurde, wird die Anwendung durch *Application.Quit()* selbstständig geschlossen. Dies wird genutzt, um Fehlerquellen durch den Anwender auszuschließen. So schließt sich das Programm erst, wenn sichergestellt wurde, dass die Daten vollständig ausgeschrieben werden konnten.

Details zum Datenformat

Um die Angstdaten mit den Abstandsdaten zu synchronisieren, werden sie jede Sekunde im Programm in einer Liste aufgenommen und werden bei Beendigung der Anwendung in eine neue Datei abgespeichert. Dabei wird detailliert der Abstand zwischen Kopf, linker Hand und rechter Hand festgehalten und parallel zu der derzeit angegebenen Angst abgespeichert. Zum nachträglichen Synchronisieren der Daten wird sowohl die Unix-Zeit, sowie die exakte Zeit durch eine Atomuhr mit abgespeichert. In der folgenden Abbildung 35 kann ein Ausschnitt einer entsprechenden CSV-Datei angesehen werden.

	A	B	C	D	E	F
1	Head	Left	Right	Fear	Timer	RealTimeTimer
2	4,456518	3,782794	3,782794	0	1653507034	2022-05-25 19:30:34.004
3	4,456408	3,782794	3,782794	0	1653507035	2022-05-25 19:30:35.004
4	4,451283	3,782794	3,782794	0	1653507036	2022-05-25 19:30:36.003
5	4,5835	3,782794	3,782794	0	1653507037	2022-05-25 19:30:37.003

Abbildung 35: Ausschnitt der resultierenden CSV-Datei

11.6 Studiendesign

11.6.1 Studienaufbau

Um die SenseGlove Nova in der hier vorgestellten BAT-Anwendung zu evaluieren, wurde das zuvor entwickelte Studiendesign zur Integration der Manus Prime X Haptic VR Handschuhe in die Suchtentwöhnungsanwendung *ANTARES* verwendet (siehe auch Kapitel 10.5). So wurden insgesamt zwei Durchläufe angesetzt: 1. Controller-BAT (O) und 2. Handschuh-BAT (SN), die in dieser entsprechenden Reihenfolge getestet werden sollten. Um die Ergebnisse auch hier anschließend gut mit denen der Vergleichsstudie aus Kapitel 9.6 gegenüberzustellen, wurden auch hier dieselben Probanden eingeladen.

11.6.2 Art der Erhebung

Um die Immersion zu erheben, wurden erneut die standardisierten Präsenzfragebögen nach *igroup* [138] und Stems (Version 2) [378] verwendet.

Der Haptikfragebogen nach Cappello et al. [37] wurde ebenfalls wiederverwendet. Zusätzlich wurden auf einige selbst konzipierte Fragen als Ergänzung zurückgegriffen, um eine mögliche Veränderung zwischen den SenseGlove Nova Szenarien feststellen zu können.

Um die Ergebnisse am Ende in einen gesamten Kontext zusammenfassen zu können, wurde auch hier auf die Likert-Skala mit 7 Werten zurückgegriffen, wobei der Wert 3 für eine volle Zustimmung und der Wert -3 für eine volle Ablehnung der Aussage stand.

11.6.3 Ablauf der Studie

Da es um die Evaluation einer Modifikation einer Anwendung ging, wurde für alle Probanden eine feste Reihenfolge gewählt. So wird zunächst die originale Anwendung mit der Controllersteuerung vorgestellt. Dort werden die Probanden angewiesen, gemäß Abschnitt 11.5 den Ablauf durchzuführen. Nach dem anschließenden Ausfüllen der Fragebogen folgte dann die Anwendung mit den SenseGlove Nova. Dafür werden die Handschuhe zuvor durch das Programm von *SenseGlove* kalibriert und im Programm den Trackern zugeordnet. Anschließend wird der Ablauf mit den Handschuhen und der virtuellen Kurbel durchgespielt. Hierbei wird jeder Proband zusätzlich auf die haptischen Eindrücke hingewiesen, damit diese ausgiebig von den Probanden getestet werden können. Nach Beendigung der Anwendung wurden sie abschließend gebeten, erneut die Fragebögen auszufüllen.

11.7 Ergebnisse

Insgesamt haben zehn Personen an dieser Studie teilgenommen. Davon waren 60% Frauen und 40% Männer. Das Durchschnittsalter betrug 27,8 Jahre auf alle Teilnehmer berechnet.

Die allgemeine technische Kompetenz der Teilnehmer lag mit einem Wert von 1,4 etwas über dem Mittelmaß. So sagten alle Probanden aus, dass sie ihren Computer jeden Tag nutzten. Wie lange pro Tag war sehr unterschiedlich. So reichte die Spanne von unter einer Stunde bis mindestens acht bis zehn Stunden täglich. Erfahrungen mit VR wurden durchschnittlich mit einer 0,7 bewertet. Möglicherweise ist der Wert etwas angestiegen, da die Personen durch die vorherige Studie etwas Erfahrungen sammeln konnten.

Immersion und Präsenz nach *igroup*

In der folgenden Tabelle 12 sind die Ergebnisse der vier Kategorien des Fragebogens nach *igroup* zusammengetragen und stellen die Ergebnisse beider Szenen gegenüber.

Kategorie	Generelle Präsenz	Räumliche Präsenz	Involviertheit	Realismus
Controller	1,7 (2)	1,5 (1,7)	0,675 (0,75)	0,825 (0,75)
SenseGlove	1,9 (2)	2,08 (2,3)	0,725 (0,625)	0,95 (0,875)

Tabelle 12: Mittelwert und (Median) der Ergebnisse nach *igroup*

Neben einem Ausreißer hat sich die Bewertung der generellen Präsenz zwischen den beiden Szenen nicht verändert. Dies würde den Ergebnissen der anderen Studien entsprechen, die alle aufzeigten, dass trotz haptischer Integration kaum eine Änderung der generellen Präsenz festgestellt werden konnte. So scheint trotz der zusätzlichen Technik kein Unterschied darin zu bestehen, ob die Person sich in der virtuellen Welt anwesend gefühlt hat.

Die räumliche Präsenz scheint dagegen besonders durch die Handschuhweiterung profitiert zu haben. Mit einem Wert von 2,08 ist dieser höher als der Wert bei der originalen Szene mit 1,5. So waren alle Fragen, die diese Kategorie maßgeblich beeinflussen, mit den Handschuhen höher bewertet. Insbesondere die Frage „Ich hatte nicht das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein“ stand besonders hervor. Hier erzielte die originale Anwendung nur eine Wertung von -0,1, wohin gegen die zweite Szene einen Wert von -1,9 verzeichnen konnte, was darauf schließen lässt, dass die haptischen Handschuhe das

Zugehörigkeitsgefühl zur virtuellen Welt steigern.

Bei der Involviertheit liegen die Wertungen sehr nahe beieinander, wobei die Nutzerangaben, dass die reale Welt mit den Handschuhen etwas deutlicher wahrzunehmen war, sie sich jedoch insgesamt mehr in den Bann gezogen gefühlt haben.

Ähnlich sieht es beim Realismus aus. Auch hier sind die Werte recht nahe beieinander, wobei jedoch die Realismuswertung mit den Handschuhen minimal besser bewertet wurde. Die originale Szene erreichte eine Wertung von 0,825 und die modifizierte Szene eine Wertung von 0,95. Möglicherweise resultiert dies aus den haptischen Eindrücken, da die haptischen Handschuhe auf virtuelle Objekte mit haptischem Feedback reagieren.

Insgesamt zeigt die Auswertung des *igroup*-Fragebogens bereits die Tendenz auf, dass die Erweiterung durch die haptischen Handschuhe die Anwendung aufzuwerten scheint. Insbesondere die räumliche Präsenz scheint davon zu profitieren.

Immersion und Präsenz nach Stems (Version 2)

Um die mögliche Bereicherung der Anwendung, die durch den *igroup* Fragebogen festgestellt wurde, noch einmal detaillierter zu betrachten, wurde im nächsten Schritt der Fragebogen nach Witmer und Singer ausgewertet. Die Ergebnisse der Haupt- und Unterkategorien sind in der folgenden Tabelle 13 mit Mittelwert und Median aufgelistet:

Kategorie	Controll	Sensory	Distraction	Realism	Involvement	Natural	Auditory	Haptics	Resolution	Interface Quality
BAT	1,91 (2,15)	1,75 (2)	-1,75 (-1,83)	1,81 (2,21)	2,06 (2,25)	1,23 (1,67)	1,93 (2,17)	1,4 (2)	1,6 (2)	2,7 (3)
SenseGlove	1,78 (1,69)	1,88 (2)	-1,2 (-1,33)	1,97 (2,07)	2 (2,04)	1,43 (1)	1,77 (2)	1,8 (1,5)	1,95 (2)	1,9 (2,3)

Tabelle 13: Mittelwert und (Median) nach Stems (Version 2)

Zur Auswertung der einzelnen Bereiche wird zunächst auf die Hauptfaktoren eingegangen. Der erste befasst sich mit der Steuerung und den Interaktionsmöglichkeiten, den sogenannten Kontrollfaktoren. Hier schneidet der Controller besser ab (1,91) als die haptischen Handschuhe (1,78). Obwohl die Erfahrungen mit den Handschuhen näher an die reale Erfahrung kam (O:0,8 SN: 1,3), fühlten sich die Teilnehmer durch diese in der Interaktion eingeschränkter (O:2,7 SN:1,7) und empfanden eine stärkere Verzögerung zwischen ihren Interaktionen und der Durchführung im Programm (O:2,3 SN:1,7).

Die sensorischen Faktoren wurden in der modifizierten Anwendung etwas besser bewertet als der originale VR-BAT (O: 1,75 SN:1,88), wobei diese Werte bei Betrachtung des Median gleich bewertet wurden. So gaben die Personen an, die virtuelle Welt mit den Handschuhen besser erkunden (O:1,1 SN:2,1) und Objekte besser untersuchen zu können

(O: 1,5 SN: 2,1), wohin gegen sie die Geräusche nicht so gut erkennen konnten (Median O:2,5 SN:2). Dies könnte ähnlich wie bei dem TactSuit X40 durch die hörbaren Motoren kommen, die für das entsprechende Force Feedback sorgen und die auditiven Eindrücke stören könnten.

Dadurch scheinen die Handschuhe auch mehr Ablenkung zu erzeugen (-1,2) als die Controller (-1,75). Neben den zuvor erwähnten auftretenden Einschränkungen in der Interaktion wurde die Kontrollmechanismen etwas störender wahrgenommen (O: -2,5 SN: -1,8).

Der Realismus ist wie bei der Auswertung von *igroup* in der Szene mit den Handschuhen etwas höher bewertet (1,97) als in der originalen Szene (1,81). Die realitätsnähere Interaktion und die bessere Möglichkeit, Objekte zu untersuchen, erzeugt diese minimal höhere Wertung, die jedoch bei der Betrachtung des Medians nicht belegt wird. Insbesondere durch die schlechte auditive Beurteilung überzeugt die originale Anwendung bei Betrachtung des Median mehr (O: 2,21 SN: 2,07).

Nachdem die Hauptfaktoren betrachtet wurden, wird nun ein Blick auf die Unterskalen gelegt, beginnend mit dem Faktor der Involviertheit. Hier liegen die Werte sehr nahe beieinander (O:2,06 SN:2). Auch wenn die Probanden angaben, die Zeit in der Anwendung mit den Handschuhen eher aus den Augen verloren zu haben (O:0,6 SN:1,3) scheint dennoch die möglichen Probleme in der Interaktion mit den Handschuhen mehr ins Gewicht zu fallen.

Dennoch erschien die Interaktion durchschnittlich natürlicher mit den Handschuhen als mit dem Controller (O:1,23 SN:1,43), wobei sich dieser Eindruck unter Betrachtung des Medians nicht hält. Möglicherweise liegt dies an der eher komplexen Darstellung der Hände gegenüber dem Controller. So müssen bei den Handschuhen alle Finger für eine natürliche Darstellung korrekt getrackt werden, wohingegen der Controller keine beweglichen Komponenten besitzt, was für einige Probanden stärker ins Gewicht fiel.

Die Akustik war mit den Handschuhen ebenfalls schlechter, obwohl sich weder die Anwendung noch die Einstellungen während der Testungen verändert haben. Eine bereits genannte Erklärung dafür wären die hörbaren Motoren, die den Eindruck stören könnten. Die Haptik wurde dafür im Durchschnitt bei der modifizierten Version besser bewertet, was sich durch das Force Feedback erklären ließe. Hier wurde eine Wertung von 1,8 vergeben, wohin gegen die originale Szene mit der Haptik am Controller nur eine 1,4 erhielt. Aber auch hier gibt es eine Differenz zwischen Mittelwert und Median. An dieser Stelle könnte die vereinfachte Interaktion durch den Controller eine Rolle spielen, da dies

ein Kriterium bei der Bewertung der Haptik darstellt.

Die Auflösung, die sich mit der Objektuntersuchung beschäftigt, wurde mit den SenseGlove Nova auch etwas besser bewertet (O:1,6 SN:1,95). Da hier insbesondere die Interaktion mit Objekten eine Rolle spielt, scheint die Haptik dort mit den Handschuhen besser zu unterstützen.

Die Differenz in der Schnittstellenqualität ist jedoch schwerer zu erklären. Da derselbe Rechner und dasselbe HMD genutzt wurden, sollte der Unterschied geringer sein. Mögliche Gründe scheinen die Veränderung der Lichtverhältnisse, aber auch die Handschuhe selbst zu sein.

Abschließend zeigt sich, dass die haptische Technologie teils zu einer Minderung der Präsenzwertungen führt, dennoch der geringe Unterschied in den meisten Aspekten positive gewertet werden kann. Insbesondere die leichte und komfortable Steuerung über das Touchpad beim Controller scheint einer anderen Steuerungsart überlegen. Dennoch wirkt die Steuerung dadurch nicht so realistisch wie mit den Handschuhen und die Untersuchung der VR und deren Objekte ist ungenauer. In diesen Aspekten überwiegen die Vorteile dieser haptischen Handschuhe.

Bewertung der haptischen Anwendung nach dem Fragebogen von Cappello et al.

Nachdem die Anwendungen des BATs gegenübergestellt wurden, werden nun die haptischen Handschuhe von *SenseGlove* (BSN) mit den Ergebnissen der Vergleichsstudie (V) 9.7 in Relation gesetzt. Dies konnte bereits für die Manus Prime X Haptic interessante Tendenzen aufzeigen, die nun gegengeprüft werden sollen. Dazu sind die Ergebnisse von Cappello et al. in der folgenden Tabelle 14 gegenübergestellt worden:

Frage:	SenseGlove	BAT + SenseGlove
1. Wie gut konnten Sie sich auf das haptische Feedback verlassen?	1,4 (2)	1,9 (2)
2. Wie gut konnten Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?	2,3 (2,5)	2,5 (3)
3. Wie realistisch war das haptische Feedback?	1,6 (2)	1,6 (1,5)
4. Wie sehr haben das haptische und visuelle Feedback übereingestimmt?	1,2 (1,5)	2,1 (2)
5. Wie gut konnte das haptische Gerät gesteuert werden?	1,2 (1,5)	1,7 (2)
6. Wie gut empfanden Sie die Erfahrung insgesamt?	2,1 (2,5)	2,4 (2,5)
7. Wie sicher fühlten sie sich mit dem haptischen Feedback?	1,3 (2)	1,7 (2)
8. Wie gut konnten Sie die gestellte Aufgabe erfüllen?	2,1 (2)	2,4 (2,5)

Tabelle 14: Mittelwert und (Median) nach Capello et al.

Bei der ersten Betrachtung der Tabelle kommt man hier bereits zu einem ähnlichen Ergebnis wie bei den Manus Prime X Haptic VR. So scheint die allgemeine Bewertung insgesamt über alle Fragen hinweg in der immersiven Szene besser zu sein als noch in der Vergleichsszene.

Der visuelle Eindruck scheint einer der Gründe, da dieser im Schnitt verlässlicher eingestuft wurde, was womöglich auch zu einer besseren Übereinstimmung des visuellen und haptischen Eindrucks geführt hat (siehe: Frage 2 und 4).

Die Steuerung des haptischen Geräts wirkte in der immersiven Anwendung deutlich besser (V:1,2 BSN:1,7). Auch die Verlässlichkeit des haptischen Feedbacks in Frage 1 wurde im Durchschnitt besser bewertet, wobei der Median keinen Hinweis auf einen Unterschied zwischen den beiden Szenarien gibt. So scheint es insgesamt bei der ersten Testung mit den Handschuhen deutlich häufiger zu Ausreißern gekommen zu sein als noch in dem BAT-Szenario. Dies betrifft auch die Sicherheit mit dem haptischen Feedback und den Realismus der Haptik. Diese wurden im Vergleichsszenario im Vergleich zum Median im Durchschnitt schlechter bewertet. Dies lag möglicherweise an den unterschiedlichen Aufgabentypen, technischen Schwierigkeiten, die nicht erkannt wurden, oder dem Faktor, dass die Technik zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt war. Dies müsste aber in weiteren Studien mit mehr Personen erhoben werden, um eine genaue Antwort geben zu können. Leider lässt sich dies nicht aus den gestellten Fragen ableiten.

Insgesamt waren die Erfahrungen der Probanden bei der BAT-Anwendung mit den Handschuhen besser als bei dem Vergleichsszenario. Dies entspricht auch den Ergebnissen der Manus Prime X Haptic. Mögliche Gründe dafür könnten der einfachere Aufgabenaufbau sein, der beim BAT repetitiv ist, aber auch die immersive Szene, welche womöglich den Eindruck der Handschuhe verbessert hat. Ebenfalls wird in der modifizierten Szene eine andere Interaktion gefordert, indem die Kurbel betätigt wird. Auch dies könnte Einfluss nehmen. Jedoch ist dies dem Fragebogen nicht zu entnehmen. In der Summe könnten aber diese Aspekte am Ende für die besser zu bewältigende Aufgabe im BAT-Szenario gesorgt haben.

Evaluation durch eigene Fragen

Abschließend erfolgt noch die Evaluation durch eigene Fragen, welche zusätzliche die Handschuhe und die Wirkung in der Anwendung evaluieren. Auch diese wurden mit den Werten der Vergleichsstudie 9.7 verglichen, um zu schauen, wie sich die therapeutische Anwendung auf die Einschätzung der Teilnehmer ausgewirkt hat (siehe: Tabelle 15).

Frage:	SenseGlove	BAT + SenseGlove
1. Die Handschuhe waren angenehm zu tragen.	1,9 (2)	2,2 (2,5)
2. Bei der Kalibrierung der Handschuhe hatte ich Probleme.	-1,9 (-2,5)	-1,6 (-2,5)
3. Die Handschuhe waren zu schwer.	-1,3 (-2)	-1,4 (-2)
4. In der virtuellen Realität wirkten meine Hände gut repräsentiert.	1,9 (2)	2,3 (2,5)
5. Die Bewegung meiner Hände wurde ohne Verzögerung in die VR übertragen.	1,2 (2)	2,1 (3)
9. Das Greifen der Objekte fiel mir leicht.	2,1 (2)	1,8 (2)
10. Das haptische Feedback hat funktioniert.	2,3 (2,5)	2,4 (2,5)
11. Das haptische Feedback half mir beim Greifen.	1,6 (2)	1,7 (2)
12. Das haptische Feedback fühlte sich realistisch an.	1,3 (1,5)	1,3 (1,5)
13. Ich hatte Angst die Handschuhe zu beschädigen.	-1,6 (-2)	-1,7 (-2,5)

Tabelle 15: Durchschnitt und Median eigener Fragen

Der Komfort der Handschuhe wurde bei der BAT-Modifikation etwas besser bewertet, wobei die Werte doch recht nahe beieinander liegen (siehe Frage 1 und 3). Dafür scheint es durchschnittlich zu weniger Problemen bei der Kalibrierung innerhalb dem Vergleichsszenario gekommen zu sein, wobei dies nur bei wenigen Leuten der Fall war und die Betrachtung des Medians zeigt, dass die Kalibrierung insgesamt überzeugen kann (2,5). Wie bereits durch Cappello et al. erhoben, schien der visuelle und haptische Eindruck in der immersiven Szene verlässlicher gewirkt zu haben, obwohl sich in der Darstellung der Hände und der Performance nichts verändert haben sollte. Dies scheint sich auch auf die Repräsentation der Hände zu beziehen, die um 0,4 besser bewertet wurde und auch insgesamt weniger verzögert wirkte (V:1,2 BSN:2,1). Ein Grund könnte erneut die Aufgabenstellung selbst sein. Da die Hände nicht konkrete Gesten formen mussten, sondern nur für das Interagieren mit den Objekten genutzt wurden, könnte hier der Eindruck verbessert worden sein. Auch könnte die immersive Szene dafür sorgen, dass kleine Probleme bei der Darstellung der Handschuhe weniger auffallen.

Die Interaktion des Greifens wurde dafür bei dem BAT schlechter wahrgenommen (1,8) als in der anderen Anwendung (2,1), was sich aber im Median nicht ablesen lässt. Möglicherweise gab es individuelle Probleme beim Nutzen der Kurbel, die nicht wie andere Objekte einfach gegriffen, sondern eher geschoben werden musste. Das haptische Feedback wiederum hat in beiden Szenarien gut funktioniert (SN:2,4 V:2,3) und half bei der Greifinteraktion (SN:1,7 V:1,6).

Das haptische Feedback fühlte sich auch in beiden Szenen gleich realistisch an (1,5). Durch die bereits getroffenen Erfahrungen wirkten die Handschuhe scheinbar auch etwas robuster für die Teilnehmer. Auch dies lässt sich an den Zahlen ablesen.

11.7.1 Zusammenfassung

Die zusammengetragenen Resultate der Studie ermöglichen spannende Rückschlüsse darauf, wie haptische Technologie am Beispiel der SenseGlove Nova in therapeutischen Anwendungen sinnvoll integriert werden könnten.

Von technischer Seite waren die SenseGlove Nova ähnlich wie die andere getestete haptische Technologie gut in die bestehende Anwendung zu integrieren. Da jedoch bei der Nutzung des Controllers spezifische Funktionalitäten den Knöpfen zugeordnet wurden, musste die Szene deutlich stärker angepasst werden als im Vergleich zu allen anderen in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungen. Die Funktionalitäten wurde auf Knöpfe im Raum und die Kurbel übertragen, wodurch auch deutlich mehr im Code angepasst werden musste. Auch die Benutzung der Kurbel war nicht einfach zu realisieren, weswegen hier einige Grenzen der Technik aufgezeigt wurden. Von Nutzerseite aus scheinen die haptischen Handschuhe von *SenseGlove* jedoch gut wahrgenommen zu werden. Hier werden Werte zwischen zwei und drei vergeben, die diese Technik bereits von der Nutzung als gut bewertet haben.

Auch wenn beide Szenarien ein haptisches Feedback bereithielten, zeigte sich, dass die Force Feedback Handschuhe für eine bessere Wahrnehmung der Objekte in der Szene sorgen konnten als der Controller mit seinem vibrotaktilen Feedback. Die Probanden hatten das Gefühl, die Umgebung genauer erkunden zu können und bekamen insgesamt ein besser räumliche Präsenzgefühl als nur mit den Controllern. Da jedoch das haptische Feedback der Controller nur indirekt auf die Objekte im virtuellen Raum reagiert hat, müsste gezeigt werden, ob dieser Eindruck auch bestehen bleibt, würde der Controller bei der Berührung mit den Objekten vibrieren.

Neben den sehr positiven Ergebnissen zeigten sich auch einige Herausforderungen, welche die Handschuhe betreffen. So war die Gesamtwertung der Präsenz nach dem Fragebogen von Stems (Version 2) nicht signifikant besser und konnte aufzeigen, dass die Handschuhe den Controllern in einigen Aspekten unterlagen. Insbesondere drei Faktoren spielen hier eine besondere Rolle, welche die gesamte Präsenzwertung stark beeinflusst haben. So zum einen der auditive Eindruck, der durch die Handschuhe schlechter wahrgenommen wurde. Neben dem visuellen und haptischen Eindruck ist die auditive Wahrnehmung die einzige Möglichkeit, die virtuelle Realität registrieren. Da es keinen direkten Einfluss zwischen den beiden Wahrnehmungskanälen gibt, kann die Verschlechterung möglicherweise auf die Soundkulisse der Handschuhe zurückgeführt werden. Die Motoren und

Seilzüge der haptischen Handschuhe sind deutlich hörbar und könnten die Geräusche der Anwendung möglicherweise überdecken. Das würde auch den zweiten Aspekt erklären, wonach die Probanden angaben, die reale Welt noch gut wahrgenommen zu haben. Auch hier könnten die zusätzlichen Geräusche der Handschuhe den Fokus auf die haptische Hardware gelenkt haben, die es erschwerten, die reale Welt in den Hintergrund rücken zu lassen. Ein dritter Aspekt, der den vorherigen ebenfalls beeinflusst, ist die Steuerung der Anwendung selbst. Der Controller bietet eine sehr komfortable Alternative an, wodurch alle Tätigkeiten durch das Trackpad und den Trigger-Knopf ausgeführt werden können. Dies ist bei den Handschuhen etwas komplexer, indem die Hand einzelne Knöpfe am Tisch betätigen müssen. Besonders im Fokus steht hier aber die Kurbel. Sie ist der Faktor, auf den in der Entwicklung der meiste Fokus gelegt wurde, da sich hier die beiden BAT-Ausführungen in-vivo und in-virtuo am stärksten unterschieden haben. Es zeigt sich durch die Auswertung, dass der Controller insgesamt als etwas komfortabler in der Ausführung wahrgenommen wird, was auch Ziel bei der eigentlichen Umsetzung des BAT in die virtuelle Realität war. Hier sollte der Fokus weniger auf der Interaktion liegen als auf dem angstausslösenden Reiz, also der Spinne selbst. Dies scheint im Vergleich zu den Handschuhen gelungen zu sein. Jedoch zu dem Preis, dass die Anwendung in anderen Aspekten weniger immersiv erscheint und dem realen Vorbild nicht ganz entspricht. Auch der Faktor, dass die Interaktion von der Kurbel mit den Handschuhen nicht optimal mit den Skripten von *SenseGlove* umgesetzt werden konnte, fällt hierbei ins Gewicht. So mussten die meisten Testprobanden die Kurbel beim Erreichen der höchsten Position kurz loslassen, um sie neu zu „greifen“.

Bei dem Vergleich der SenseGlove Nova innerhalb der beiden Szenarien konnte gezeigt werden, dass diese Ergebnisse, denen der Manus Prime X Haptic VR ähneln (siehe auch Kapitel 10.6). So scheint eine immersive Szene mit einer einfachen Interaktion die Handschuhe insgesamt besser wirken zu lassen. Aspekte wie eine Verzögerung in der Interaktion konnten weniger von den Nutzern bemerkt werden, obwohl sich weder die Schnittstelle zu den Handschuhen noch die Optimierung geändert hat. Jedoch müssten dieser Ergebnisse mit weiteren Anwendungen geprüft werden, um die Wirkung der Anwendung auf die Technik besser zu evaluieren.

11.7.2 Fazit

Insgesamt lässt sich trotz der teils etwas geringeren Präsenz und der nicht ganz so komfortablen Steuerung die Einbindung der SenseGlove Nova als erfolgreich einstufen. So konnten alle Teilnehmer die Technik erfolgreich nutzen und die ihnen gestellte Aufgabe gut (2,5) erfüllen. Die haptischen Handschuhe, auch wenn sie nicht in allen Aspekten besser bewertet wurden als die Controller, erreichen in allen Kategorien hohe Wertungen, die darauf schließen lassen, dass die Integration erfolgreich war.

Die drei hervorgehobenen Herausforderungen müssen jedoch angegangen werden, um einen wirklichen Mehrwert gegenüber den Controllern abbilden zu können. Die etwas hinderliche Interaktion, die sich im Fragebogen von Stems (Version 2) deutlich abzeichnet, benötigt eine Alternative, um garantieren zu können, dass der Fokus der Probanden auf dem angstausslösenden Reiz und weniger auf der Interaktion liegt. Womöglich wäre eine andere Interaktionsart für das Bewegen der Spinne in der Plexiglasbox in der virtuellen Welt mit den Handschuhen besser geeignet. Eine Option könnte sein, Knöpfe wie bei dem Angstmeter in die Szene zu integrieren, mit welcher die Spinne automatisch über den Tisch bewegt werden würde. Das könnte dafür sorgen, dass die Einschränkungen in der Interaktion weniger wahrgenommen werden würden, jedoch könnte dies wiederum zu einer Reduktion des Realismus führen. Eine andere Möglichkeit wäre es, weiter an der Interaktion mit der Kurbel zu forschen und möglicherweise in Kooperation mit den Entwicklern ein passendes Skript zu entwickeln.

Um den auditiven Eindruck zu verbessern, könnte von In-Ear Kopfhörern Gebrauch gemacht werden und sich auf lautere natürliche Hintergrundgeräusche gestützt werden, die von der Soundkulisse der Handschuhe ablenken. Diese waren bisher nicht in den Szenen vorhanden. Andernfalls muss hier die Technik selbst verbessert werden, damit der auditive Eindruck nicht leidet. Dazu arbeitet das Unternehmen *SenseGlove* bereits an einer zweiten Version des haptischen Handschuhes, der im Sommer 2023 angekündigt wurde.

12 Eingliederung der eigenen wissenschaftlichen Publikationen in den Rahmen dieser Arbeit

Nachdem die für diese Arbeit erstellten Anwendungen und ihre Ergebnisse ausführlich besprochen wurden, folgen nun die veröffentlichten Publikationen, zu welchen die Autorin maßgeblich beigetragen hat, um die aktuelle Forschung in den Bereichen Virtual Reality und der Virtual Reality-Therapie zu fördern.

1. Publikationen zum Vergleich der haptischen Handschuhe

- *Conception And Implementation of an virtual Reality application for the evaluation of different types of commercially available haptic gloves* [270]

Dieses Paper stellt die in Kapitel 9 vorgestellte Vergleichsanwendung zum Vergleich der haptischen Handschuhe vor.

Erkenntnisgewinn: Design der in dieser Dissertation umgesetzten Vergleichsanwendung zum Vergleich der SenseGlove Nova und Manus Prime X Haptic VR.

2. Publikationen zum virtuellen BAT

- *Behavioural Approach Task - Virtual Reality vs. Reality* [117]

Dieses Abstract stellt die Grundidee der Umsetzung des BAT aus Kapitel 11 in die virtuelle Welt vor. Dazu wird die Grundidee des Vergleichs des in-vivo und in-virtuo BAT vorgestellt.

Erkenntnisgewinn: Das Abstract zeigt den Bedarf an virtuellen Therapien auf, welche in dieser Arbeit thematisiert wurden.

- *Behavioral Avoidance Test: Comparison between in vivo and virtual reality using questionnaires and psychophysiology* [269]

In diesem Paper wird detaillierter auf die Umsetzung des in Kapitel 11 vorgestellten BAT in der virtuellen Realität eingegangen und die geplante Studie zwischen in-vivo und in-virtuo Szenario kurz erläutert.

Erkenntnisgewinn: Haptisches Feedback kann zur Simulation von realen Eindrücken genutzt werden, um die Immersion zu steigern und Anwendungen simpler zu gestalten.

3. Publikationen zum virtuellen Gedächtnistraining

- *Customizable Memory Training in Virtual Reality with Personal Memoirs*[271]

Vorstellung des originalen VR-Gedächtnistrainings mit persönlichen Memoiren, welches in Kapitel 8 vorgestellt wurde. Diese Anwendung deckt die Individualisierung durch Bilder und lokal gespeicherte Musik ab.

Erkenntnisgewinn: Individualisierung kann die Akzeptanz und den Lernerfolg in der virtuellen Welt steigern. Haptische Ergänzungen könnten zur Steigerung der Individualisierung und Verbesserung des Lernerfolgs beitragen.

- *The Design of an Avatar in a Multiplayer Serious Game* [150]

Eine Erweiterung des vorgestellten VR-Gedächtnistrainings um einen Serverbasierten Multiplayer.

Erkenntnisgewinn: Die Modifikation zeigt die Möglichkeit der Distanztherapie und gibt Hinweise auf die mögliche Darstellung virtueller Charaktere, die auch für den in Kapitel 11 vorgestellten BAT genutzt wurden.

- *Virtual Memory Training with Innovative Haptical Features* [268]

Dieses Abstract stellt bündig die Grundidee der Umsetzung von Haptik innerhalb der selbst konzipierten VR-Gedächtnistrainings-Anwendung durch den TactSuit X40 vor.

Erkenntnisgewinn: Design der in dieser Dissertation umgesetzten Haptikerweiterung des in Kapitel 8 vorgestellten Gedächtnistrainings.

- *Extension of an Existing VR Memory Training with Haptic Impressions due to a Haptic Vest* [272]

Design der Integration der haptischen Weste in der vorgestellten Memory-Anwendung.

Erkenntnisgewinn: Finalisierung des Designs der in dieser Dissertation umgesetzten Haptikerweiterung des in Kapitel 8 vorgestellten Gedächtnistrainings.

4. Publikationen zur virtuellen Suchtentwöhnung

- *Improving the Approach-Avoidance Task in Virtual Reality Through Presence and Virtual Risk Situations* [74]

Vorstellung einer immersiven Umgebung zur Steigerung der Immersion und zur Behandlung von Alkoholsucht auf Basis des Projektes *ANTARES* [183].

Erkenntnisgewinn: Berührungspunkt der Autorin mit der Suchtentwöhnungs-Anwendung *ANTARES*. Forschung zur Berücksichtigung immersiver Umgebungen zur Steigerung der Qualität der Anwendungen.

5. Publikationen zur virtuellen Stoma-Versorgung

- *Training Application for Ostomy Patients in Virtual Reality* [119]

Vorstellung einer VR-Anwendung zur Versorgung eines künstlichen Darmausgangs (Stoma) mit einem schrittweisen Trainingsaufbau in Verbindung mit Körpertracking über das Plug-in von *RootMotion* [253].

Erkenntnisgewinn: Umsetzung von Bodytracking und erste Erfahrungen mit dem *Root Motion*-Asset, welches innerhalb dieser Arbeit für den TESLASUIT verwendet wurde.

- *Making change tangible. Enhancement of a Virtual Reality Stoma Training with Haptic Feedback* [118]

Dieses Abstract stellt die mögliche Ergänzung der Stomaversorgung durch Haptik vor. Hier wird die Integration der Manus Prime X Haptic VR vorgestellt, die möglicherweise das Training verbessern kann.

Erkenntnisgewinn: Ein haptisches Feedback wird von Testpersonen erwünscht und kann durch die Umsetzung der Manus Prime X Haptic ermöglicht werden. Somit könnte auch eine feinere Interaktion in die virtuelle Realität übersetzt werden.

6. Vorstellung von weiteren VR-Arbeiten ohne Haptikanbindung

- *Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) in medizinischen Anwendungen - Ein Überblick* [110]

Der Beitrag ist eine Vorstellung der unterschiedlichen Augmented Reality- und Virtual Reality-Anwendungen, die innerhalb der Arbeitsgruppe entstanden sind.

Erkenntnisgewinn: Vorstellung möglicher Alternativansätze für Therapieanwendungen und Training in die virtuelle Realität.

- *Virtual Reality Training Application to Prepare Medical Student's [sic] for Their First Operating Room Experience* [120]

Dieses Paper stellt eine VR-Anwendung zum Training der medizinischen Handdesinfektion unter der Verwendung der Leap Motion vor.

Erkenntnisgewinn: Veranschaulichung der Limitationen der Leap Motion, die durch haptische Datenhandschuhe ausgeglichen werden könnten.

- *Virtual and Augmented Reality for Digital Medicine - Design and Implementation of a Hybrid, Interdisciplinary Course for Engineering and Medical Students* [75]

Vorstellung von interdisziplinärer Lehre zwischen Medizininformatikern, Medizinern und Psychologen zur Erstellung fachbezogener VR- und AR-Anwendungen.

Erkenntnisgewinn: Umsetzung des Medical Emergency Aid Training (M.E.A.T.), welches durch ein immersives Szenario die Lernerfahrung verbessern möchte, was auch auf den Therapiebereich übertragen werden könnte.

7. Weitere wissenschaftliche Publikation ohne direkten Bezug zur Dissertation

- *SkillsLab+ - Augmented Reality Enhanced Medical Training* [112]
- *EIT-based Gesture Recognition Training with Augmented Reality* [111]
- *Augmented Reality Application for Simulation of Mamma Palpation* [313]
- *Überregionale telemedizinische Ergänzungsbehandlung für die ländliche Hausarztversorgung - Eine Mixed-Methods Analyse* [126]

13 Diskussion der Forschungsfragen

Nach der ausführlichen Auseinandersetzung mit unterschiedlicher haptischer Technologie müssen nun die eigentlichen Fragen dieser Arbeit betrachtet und möglichst beantwortet werden. Dazu werden im Folgenden die einzelnen Forschungsfragen noch einmal benannt und ausführlich diskutiert. Mit den eigenen Vorarbeiten, dem aktuellen Forschungsstand und der Umsetzung der Technik in einem therapeutischen Rahmen sollen so Antworten gegeben werden können, welche eine grundsätzliche Richtung der Forschung in diesem Bereich skizzieren soll:

13.1 Diskussion der technischen Fragestellungen:

1. Wie gut kann haptische Technologie in (bestehende) Anwendungen eingebunden werden?

Die derzeit auf dem Markt befindlichen haptischen Technologien werden in den meisten Fällen mit eigenen Schnittstellen, Programmen und Dokumentationen an den Kunden weitergegeben. Da viele Technologien experimentell sind und sich während der Zeit der Nutzung weiterentwickeln, war während der gesamten Arbeit häufig eine Einarbeitung in neue Skripte oder sogar ganze SDKs und Programme erforderlich. Nicht alle hiervon waren gut dokumentiert und mussten in einigen Fällen selbst aufgearbeitet werden. Dieses Problem betraf insbesondere den getesteten TESLASUIT (siehe Kapitel 7), bei welchem die Skripte eigenhändig abgeändert werden mussten, damit eine Nutzung überhaupt möglich wurde. Hier zu beachten ist, dass die meiste Technik, die für diese Arbeit genutzt wurden, sehr neu auf dem Markt erschienen war und dementsprechend noch in der Entwicklung stand.

Der Frage, wie gut sich die Technik in virtuelle Anwendungen integrieren ließ, kann dennoch positiv entgegengestanden werden. Sobald das entsprechende SDK aufgearbeitet war, gab es rückblickend wenige Probleme bei der Integration der haptischen Erweiterung in eine *Unity*-Anwendungen. Da viele SDKs für diese Entwicklungsumgebung ausgelegt sind und durch Beispielszenen die Einbindung gut dargestellt wird, kann in den meisten Fällen auf diese bereitgestellten Prefabs zurückgegriffen werden. Hier überzeugte der TactSuit X40 am meisten. Die Einbindung benötigt nur ein einzelnes Prefab. Sobald die Weste über den *bHaptics Player* verbunden ist, kann sie frei in der Anwendung genutzt werden. So kann auch über dieses Programm eine direkte Verbindung über den AUX-Eingang geschaffen werden, wodurch ein haptisches Feedback bereits aus dem Audio generiert werden kann,

ohne ein zusätzliches Programm oder Technikerfahrung zu benötigen. Der nachträglich erschienene Überbau mit dem Webinterface ist zu Beginn etwas ungewöhnlich, jedoch gibt es hierzu gute Anleitungen der Entwickler.

Das Einbinden der haptischen Handschuhe ist etwas komplexer. Bei den Manus Prime X Haptic VR werden zwei Prefabs innerhalb von *Unity* benötigt. Jedoch ist hier die beiliegende Software etwas komplexer. Sie erlaubt das Kalibrieren, das Zuweisen der Tracker und besitzt einige Einstellungen, die womöglich etwas überfordern können. Die SenseGlove Nova besitzen dagegen eine einfachere Softwareanbindung, die nur die Kalibrierung übernimmt, benötigen dafür jedoch mehr Prefabs, die auf die Szene abgestimmt werden müssen. So müssen die VR-Kamera und die Tracker einzeln in den Skripten zugewiesen werden.

Die Einbindung des haptischen Anzugs von *TESLASUIT* erschien am komplexesten. Die zu Beginn fehlende Dokumentation und fehlende Prefabs für die Nutzung mit VR erschwerten den Einstieg. Auch die angebotenen Programme, die weder auf der Internetseite noch intern erklärt wurden, benötigten viel Einarbeitungszeit und wirkten teils überfordernd. Zwar wird derzeit an diesen Aspekten von *TESLASUIT* gearbeitet, jedoch waren die Herausforderungen auch geschuldet an den vielen Möglichkeiten des Anzugs zu der Zeit der Entwicklung sehr einschränkend.

Das Einbinden von haptischer Technologie in bestehende Anwendungen hatte andere Herausforderungen als zunächst gedacht. Es wurde erwartet, dass es Probleme zwischen den einzelnen Schnittstellen geben würde. Die SDKs vertrugen sich jedoch in allen getesteten Fällen mit den bestehenden Programmen und die Technik konnte meist durch das Ergänzen der Prefabs in die Anwendungen integriert werden. Der Einbau der haptischen Handschuhe in die therapeutischen Anwendungen hielt wenige Herausforderungen bereit, wodurch nur kleine Modifikationen am Code vorgenommen werden mussten. Lediglich die Kurbel des *Kurbel*-BAT zeigte die Grenzen der Technik auf. Dies ist jedoch ein sehr spezieller Fall und konnte dennoch in die virtuelle Welt übertragen werden, wobei auch hier weiter an der Technik und der Umsetzung gearbeitet werden muss.

Von der technischen Seite wurde festgestellt, dass die Einbindung der getesteten haptischen Technologie in allen Fällen gut möglich war. Auch wenn es zwischenzeitlich Probleme durch die Änderung der SDKs oder der zugehörigen Programme gab, so konnte meist schnell adaptiert werden. Jedoch ist nicht alle Technik gleich

komplex und in manchen Fällen wird mehr Programmiererfahrung und Einarbeitungszeit benötigt als bei anderen. Auch wenn dies ein kleiner Ausschnitt auf mögliche Technologien ist, sind die getesteten Modelle sehr unterschiedlich. Sei es der Preis, die Entwicklungsdauer oder Zeit, die diese Technik auf dem Markt bereits erhältlich ist. Demnach ist davon auszugehen, dass diese Ergebnisse womöglich auch auf andere auf dem Markt erhältlichen haptischen Technologien übertragbar sind.

2. Welche Vor- und Nachteile bieten die unterschiedlichen haptischen Technologien?

Die kommerziell erwerbliche Hardware, die innerhalb dieser Arbeit betrachtet wurde, deckt drei unterschiedliche haptische Techniken ab. Entsprechend der Ergebnisse konnten alle einen positiven Effekt auf die Immersion verzeichnen und scheinen eine sinnvolle Ergänzung der virtuellen Welt zu sein. Dennoch unterscheiden sich die Aspekte zwischen den Techniken, weshalb diese im Folgenden noch einmal im Detail aufgeschlüsselt werden:

- **Vibrotaktiler Feedback:** Das vibrotaktile Feedback wird von insgesamt drei verschiedenen haptischen Modulen primär verwendet, dem *HTC VIVE Pro* Controller, dem *TactSuit X40* von *bHaptics* sowie den *Manus Prime X* Haptik VR-Handschuhen. Die *SenseGlove Nova* besitzen ebenfalls vibrotaktiler Feedback, welches jedoch nicht spezifisch betrachtet wurde. Da alle drei haptischen Module die Haptik in den Anwendungen anders nutzten, ist ein direkter Vergleich nur schwer möglich. In Fällen, in welcher der haptische Eindruck eine direkte physische Reaktion auf die virtuelle Welt war (Vibration beim Berühren von Gegenständen) wurde das haptische Feedback als am glaubwürdigsten wahrgenommen. Diese Erkenntnis scheint für alle haptischen Technologien zu zählen und sollte bei der Verwendung berücksichtigt werden. Aus den Ergebnissen der Vergleichsstudie 9.7, in welcher ähnliche Technologie mit unterschiedlichem haptischen Eindruck verglichen wurden, lässt sich jedoch ableiten, dass das vibrotaktile Feedback im Schnitt unrealistischer als beispielsweise Force Feedback wahrgenommen wird. So scheint diese Technologie von der reinen Haptik nicht ganz überzeugen zu können. Jedoch zeichnet sich die Technik in allen Fällen durch ihre Usability aus. An vibrotaktilem Feedback wird bereits seit vielen Jahren gearbeitet. Dementsprechend sind die Geräte meist etwas komfortabler und leichter zu bedienen und auch das Erstellen von

neuen haptischen Eindrücken ist in allen Fällen technisch gut umzusetzen. Wichtig ist, dass darauf geachtet wird, den haptischen Eindruck richtig zu „codiert“ und an das Geschehen in der VR anzupassen.

In keiner der hier vorgestellten Studien gab es Hemmungen von den Probanden gegenüber dieser Technologie.

- **Elektroimpulse:** Die Haptik durch Elektroimpulse konnten in dieser Arbeit nur innerhalb einer Forschungsgruppe evaluiert werden. Dem liegt der bereits größte Nachteil der Technik zugrunde, die Elektrizität selbst. Diese schafft es teils sehr glaubwürdige haptische Eindrücke zu vermitteln, kann dementsprechend jedoch bei falscher Kalibrierung auch zu Unwohlsein und zu Schmerzen führen. Zwar kann leichter Schmerz und Unwohlsein für einige haptische Eindrücke zu noch realistischeren Wirkungen führen, z. B. bei dem Simulieren des Rückstoßes einer Waffe, jedoch könnten diese Effekte in therapeutischen Anwendungen eher nachteilig wirken. Unbeabsichtigter Schmerz könnte die Akzeptanz für solche Technologien senken und auch die Abbruchraten deutlich erhöhen. In einem Forschungsumfeld kann diese Technik gut genutzt werden, jedoch würde sie sich nach den Ergebnissen noch nicht für den Alltag in therapeutischen Kliniken eignen. Dafür fehlen noch Grundlagen wie ein Sicherheitskonzept, das in der nächsten Zeit ausgearbeitet werden müsste. Dennoch ist diese Technik von der reinen haptischen Wirkung sehr innovativ und kann zu ganz anderen haptischen Eindrücken führen, als andere Technologie am Markt.
- **Force Feedback:** Das Force Feedback der SenseGlove Nova schneidet im Vergleich zu dem vibrotaktilen Feedback der Manus Prime X Haptik VR deutlich besser ab. So hatten die Testpersonen mit dieser Technik am ehesten das Gefühl, die Umgebung genau durchsuchen und Objekte untersuchen zu können und würden diese Technik Vibrationen bevorzugen. Das Simulieren der Formen und Widerstände von Objekten ermöglicht es, viele Inhalte der virtuellen Welt abzubilden, wodurch das haptische Feedback am realistischsten wahrgenommen wurde. Dennoch führt das Zurückhalten der Fingerspitzen auch zu möglichen Einschränkungen in der Bedienung der Anwendung. Zusätzlich ist die Technik noch recht laut und die Widerstände noch nicht fließend, was einen negativen Einfluss auf die Immersion nimmt. Dies bezieht sich hier im Speziellen auf die SenseGlove Nova, wobei dies mit anderer Force Feedback Technik abgeglichen werden muss.

3. Welche haptischen Technologien können sinnvoll miteinander verbunden werden?

In dieser Arbeit wurde nur zwei unterschiedliche Kombinationen von haptischer Hardware verwendet, die in beiden Fällen auch benötigt wurden. Dabei handelt es sich um die Kombination der haptischen Kleidung, TESLASUIT und TactSuit X40, mit den *HTC VIVE Pro* Controllern. Diese Controller wurden als sinnvolle Interaktionsschnittstelle verwendet und dienten zum verlässlichen Tracken der Hände. Auch wäre es möglich gewesen, die haptischen Handschuhe anstelle von Trackern, mit den Controllern auszustatten, um die Handschuhe verlässlich im Raum zu positionieren. Jedoch sind die Tracker leichter, weshalb sich für diese Alternative entschieden wurde. Andernfalls scheint eine Kombination zwischen den Handschuhen und dem Controller als nicht sehr sinnvoll, da sie sich in ihrer Steuerung gegenseitig behindern würden und primär den gleichen Nutzen verfolgen. Die Kombination aus Handschuh und haptischer Kleidung könnte ebenfalls sehr interessant sein, konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht erarbeitet werden. Hierbei würden sich neue Fragen stellen. Zum Beispiel, welche taktilen Empfindungen gut harmonieren. Sollten die Handschuhe und die Weste das gleiche haptische Feedback verwenden oder sich doch gegenseitig ergänzen? Dies sind Fragen, die womöglich in einer weiteren Arbeit diskutiert werden könnten.

4. Für welche Zielgruppe eignen sich haptische Technologien und für welche nicht?

Die erhobenen Ergebnisse beziehen sich auf eine jüngere, gesunde Probandengruppe im Alter zwischen 16 und 40 Jahre. Aus diesem Grund können die derzeitigen Ergebnisse nur auf diese Gruppe bezogen werden. Jedoch schienen insgesamt keine nennenswerten Einschränkungen aus dieser Zielgruppe heraus für die Technik zu bestehen. Alle Probanden, ob nun mit viel oder wenig Technikerfahrungen, konnten alle gestellten Aufgaben mit der neuen haptischen Technologie erfüllen. Dennoch schienen Personen mit VR-Erfahrung etwas besser zurechtzukommen, was im Therapiekontext beachtet werden sollte. Dies sollte jedoch nicht zu starken Einschränkungen führen. So sollte es reichen, wenn die Patienten die Möglichkeit bekommen, sich zuvor mit der Technik vertraut zu machen, bevor sie diese im Therapiekontext nutzen. Dies kann durch Tutorial-Anwendungen oder bereits erhältliche VR-Spiele erfolgen. Ein Problem, was in den Testungen aufgetreten ist, war die Passgröße einiger Module, insbesondere bei den Handschuhen und dem TESLASUIT. Besonders kleine, große, korpulente oder schlanke Personen könnten ein Sondermodell benötigen, was sie zu Personengruppen machen, die womöglich weniger von der Technik profitieren. Auch sollte bei der Verwendung von Elektroimpulsen und technischen Implantaten angepasst werden. Hier würde sich womöglich eine andere haptische Technologie besser eignen und sicherer sein. Personengruppen, die besonders von solcher Technologie profitieren können, sind hörgeschädigte und gehörlose Menschen. Informationen, die sonst über auditive Eindrücke vermittelt werden, könnte so mit Haptik übertragen werden. Ebenfalls zählen auch haptische Lerner zu Personengruppen, die einen Vorteil aus dem haptischen Reiz ziehen können.

Bei allen Personengruppen muss die Individualisierung jedoch berücksichtigt werden. So empfanden einige Personen beispielsweise das vibrotaktile Feedback der Weste als unpassend. Für ältere, jüngere oder empfindsame Nutzer sollte darauf geachtet werden, die Stärke des Feedbacks entsprechend anzupassen, damit auch diese Personengruppen davon profitieren.

5. Welche haptischen Technologien eignen sich für den Therapiealltag mit VR?

Von der technischen Seite aus konnten alle getesteten haptischen Technologien in einen therapeutisch sinnvollen Kontext gebracht werden. So hatte jede haptische Erweiterung einen Nutzen, welcher sich im entsprechenden Kontext erkennen ließ. Insgesamt scheinen die haptischen Handschuhe technisch auf einem so hohen Niveau zu sein, dass hier der größte Mehrwert gesehen werden kann. Sie ermöglichen eine recht verlässliche und glaubwürdige Interaktion in der virtuellen Welt, die im Vergleich zu anderen, bereits auf dem Markt etablierten Technologien, ähnlich gute Wertungen erzielen konnten. Die Handschuhe fördert eine intuitive Steuerung und wirkten sich in den meisten Fällen positiv auf die Immersion und Präsenz aus. Des Weiteren könnten sie für eine Vielzahl an VR-Umsetzungen genutzt werden, da in der realen Welt die Hände in den meisten Therapien für die Interaktion genutzt werden. Das haptische Feedback ergänzt sinnvoll diese recht selbsterklärende Interaktion.

Die haptischen Westen sind etwas komplexer in ihrer Integration und eignen sich nur für spezifische Anwendungsfälle. Auch wenn haptisches Feedback den Realismus steigern kann, so kann dieser auch, falls nicht benötigt, von der eigentlichen Aufgabe ablenken und als weniger glaubwürdig eingestuft werden. Jedoch bieten die haptischen Westen auch einige spannende Möglichkeiten. Wirkt die virtuelle Welt auf den Körper des Nutzers ein, kann eine haptische Rückmeldung durchaus gut unterstützen und die Immersion positiv beeinflussen. Ebenfalls bietet der Körper eine größere Fläche für haptische Reize an, die wie bei dem Memory oder dem eigenen Anzug von Mirzaei et al. [204] genutzt werden können, um auditive Eindrücke zu unterstützen oder gar zu ersetzen.

Für therapeutische Praxen könnten fast alle der vorgestellten haptischen Module interessant sein. Da die haptischen Handschuhe universell einsetzbar sind und bei der Auswahl bereits auf Preis, Praktikabilität und Umsetzbarkeit geachtet wurden, sind die Manus Prime X Haptic VR sowie die SenseGlove Nova gut geeignet. Die Nutzung der Programme wird bei beiden Modulen gut erläutert. Somit können auch weniger technikaffine Personen mit dieser Technologie umgehen. Ebenfalls war die Akzeptanz der Nutzer gegenüber den beiden Modellen sehr hoch, was zu einer Steigerung der Motivation führen könnte. Einziger Nachteil aller haptischen Technologie sind die noch fehlenden Softwareumsetzungen von Therapien, wodurch

derzeit auf keine fertigen Anwendungen zurückgegriffen werden kann. Hier besteht ein deutlicher Bedarf.

Das einzige haptische Modul, welches diese Limitation umgehen kann, ist der Tact-Suit X40. Diese vergleichbar günstige Weste kann auch Haptik aus Audioquellen generieren. So benötigt es hierfür kein spezifisches Programm. Jedoch müsste im Einzelnen geschaut werden, wie die Haptik aus Audio sinnvoll genutzt werden kann, um im Therapiepraxisalltag zu unterstützen.

Einzig der TESLASUIT eignet sich hinsichtlich der Ergebnisse noch nicht für den Nutzen in den Praxen. Dafür ist er zu teuer und benötigt eine gewisse Technikkompetenz, um überhaupt genutzt werden zu können. Durch die limitierten Passgrößen und die Hygiene wären mehrere Anzüge nötig, die den Preis weiter steigern und mehr Platz benötigen würden. Insbesondere die Haptik benötigt mehr Sicherheit, damit auch weniger erfahrene Personen zu zielführenden Eindrücken kommen können.

Dementsprechend scheinen von technischer Seite aus fast alle betrachteten haptischen Module theoretisch im Therapiealltag integriert werden zu können, auch wenn die Technik noch einige Herausforderungen bereithält und noch nicht vollständig ausgereift ist. Derzeit scheint sie noch nicht in allen Aspekten den bereits etablierten Techniken überlegen.

13.2 Psychologische Fragestellungen:

1. Verändert haptische Technologie die Wahrnehmung der Nutzer innerhalb der virtuellen Realität?

Nach den Ergebnissen der einzelnen Studien scheint die haptische Technologie messbar Einfluss auf die Wahrnehmung des Nutzers zu haben. Insbesondere bei der Auswertung der Immersion und Präsenz gibt es einige Unterschiede, die jedoch in der nachfolgenden Forschungsfrage genauer betrachtet wird. Nicht nur scheint die haptische Technologie Einfluss auf die Wahrnehmung des Nutzers innerhalb der virtuellen Realität zu nehmen, auch scheint es so, dass das Szenario Einfluss auf die Wahrnehmung der haptischen Technologie nimmt. Beim Betrachten der Handschuhe in verschiedenen Anwendungen konnte gezeigt werden, dass die Auswertungen der Haptik sich in einigen Kategorien unterscheiden. Zwar wurden in diesen Fällen immer nur zwei Anwendungen miteinander verglichen, dennoch sind dort deutliche Tendenzen zu erkennen, die weiter Untersuchungen benötigen. Obwohl in bei beiden Fällen auf eine möglichst gleiche Optimierung geachtet und die gleichen Schnittstellen verwendet wurden, kam es dennoch zu messbaren Unterschieden. Dies wurde bei dem Manus Prime X Haptic VR besonders deutlich, bei welchem die Handschuhe in der therapeutischen Anwendung höhere Wertungen erzielten, auch wenn die erfragten Aspekte sich zwischen den Anwendungen nicht verändert haben sollten. Ähnliches ist auch bei den SenseGlove Nova festzustellen. So wurde beispielsweise die Verlässlichkeit des Feedbacks oder die Repräsentation der Hände in den unterschiedlichen Anwendungen anders wahrgenommen. Woher diese Unterschiede in der Wertung kommen, muss weiter untersucht werden. Dies könnte unter anderem an der Anwendung zum Vergleich der Technologie liegen. Diese ist auf die einzelnen Funktionalitäten der haptischen Handschuhe fokussiert und arbeitet auch Schwächen der Handschuhe für die Nutzer sichtbar heraus. Dies ist in den therapeutischen Anwendungen weniger der Fall, wodurch die Handschuhe möglicherweise als verlässlicher wahrgenommen werden. Aber auch die Umgebung und die damit einhergehende Immersion der therapeutischen Anwendungen könnten die Wirkung der haptischen Integration positiv beeinflussen. So wirken die Hände in einem realistischeren Umfeld möglicherweise auch realistischer.

2. Hat haptische Technologie Einfluss auf die Immersion innerhalb einer virtuellen Anwendung?

Diese Frage lässt sich nach den derzeitig gesammelten Ergebnissen mit einem „Ja“ beantworten. Die betrachteten Forschungsarbeiten beispielsweise von Gibbs et al. [109] konnte bereits durch ihre haptische Ergänzung einen Anstieg der Präsenz verzeichnen, ebenso wie der *Transcalibur* [282, 283] mit den Gewichten. Auch andere haptische Geräte wie das *Mouth Feedback* von Shen et al. [280] können nach den derzeitigen Ergebnissen für ein immersives Gefühl sorgen. In allen Fällen war die Anwendung und Haptik jedoch genau aufeinander abgestimmt und wurde für den Versuch so konzipiert.

Im Falle der hier betrachteten Studien war dies anders. Die meisten Anwendungen waren bereits vor der Anschaffung der Technik konzipiert und wurden im Nachgang um die Haptik erweitert. Jedoch konnte in allen Fällen eine Änderung der Immersion und Präsenz durch die Technik nachgewiesen werden. Durch die Fragebögen von *igroup* und Stems (Version 2) zeigte sich, dass die Technik Einfluss auf die von dem Fragebogen berücksichtigten Aspekte nehmen können. So konnte die Wirkung der haptischen Technologien im Vergleich zu etablierter Technik detailliert betrachtet werden.

Es zeigte sich, dass die SenseGlove Nova im Vergleich zu den *HTC VIVE* Controllern nach dem Fragebogen von *igroup*, insbesondere die räumliche Präsenz verbessern. Aber auch die Bewertung des Realismus profitierte von dem Force Feedback. Durch die Betrachtung nach Stems (Version 2) konnte deutlich herausgearbeitet werden, dass die Handschuhe für eine bessere Wahrnehmung der virtuellen Welt sorgen. Durch das Gefühl, die Umgebung aktiver und besser untersuchen zu können, wurde die Präsenz positiv beeinflusst. Jedoch war die Steuerung nicht so komfortabel wie die mit dem Controller und auch die Akustik war schlechter, wodurch trotz insgesamt guter Wertungen die SenseGlove Nova zu einer ähnlichen Bewertung bei der Präsenz wie die Controller kamen.

Die Manus Prime X Haptic VR-Handschuhe wurde mit der Leap Motion verglichen, die bereits deutlich näher an einer natürlichen Interaktion steht als beispielsweise ein Controller. Die Interaktion wird ebenfalls durch die eigenen Hände getätigt, die von dem Kamerasystem aufgezeichnet werden. Nach den Ergebnissen des *igroup*-Fragebogens konnten die Handschuhe zu keiner Verbesserung der Präsenz führen. Insbesondere die Involviertheit wurde deutlich schlechter bewertet, da die Testpersonen mit den Handschuhen die reale Umgebung deutlicher wahrnehmen konnten.

Dies konnte auch aus der Auswertung des Fragebogens nach Stems (Version 2) entnommen werden. Dafür wirkten nach diesem Fragebogen die Handschuhe realistischer und die Reaktion ihrer Aktionen vorhersehbarer. Die Probanden hatten das Gefühl, die Umwelt genauer untersuchen zu können, was sehr wahrscheinlich auf das haptische Feedback zurückzuführen ist. Jedoch wirkte die visuelle Darstellung der Hände durch die Leap Motion natürlicher, was möglicherweise an dem kamerabasierten Tracking, aber auch der Darstellung durch andere Handmodelle liegen könnte. Insgesamt gleichen sich auch hier die genannten Vor- und Nachteile aus, wodurch auch hier ähnliche Präsenzbewertungen hervorgehen. Es wäre jedoch möglich, die Darstellung und Integration der Manus Prime X Haptic VR weiter zu optimieren.

Auch die Haptik der *bHaptics* Weste beeinflusst die Aspekte der Präsenz. So steigt nach dem Fragebogen von *igroup* die räumliche Präsenz im geringen Maße, wohingegen das Gefühl der Involviertheit deutlich von der Haptik zu profitieren scheint. Dagegen wird der haptische Eindruck nicht sehr realistisch eingestuft und sorgt an dieser Stelle für eine Reduktion der Präsenz. Dies lässt sich an den Ergebnissen nach dem Fragebogen nach Stems (Version 2) ebenfalls herausarbeiten. Die Interaktion wirkt hiernach unrealistisch und kann mit keinen Erfahrungen aus dem realen Alltag verglichen werden, wodurch die Nutzer die Reaktion der Weste nur schwer einschätzen konnten, was sich insgesamt eher negativ auf die Präsenz auswirkt. Dies muss nicht an der Haptik per se selbst liegen, sondern ist womöglich auf die Einbindung in der Anwendung zurückzuführen. Zwar ergänzt die Haptik die Wahrnehmungskanäle für die Gedächtnistrainingsaufgabe, jedoch sind die Impulse keine direkten Reaktionen auf die Umwelt und wurde auch nicht an die Motive oder Umgebung angepasst. Dies zeigt, dass bei der Integration von Haptik sehr gewissenhaft vorgegangen werden muss und immer der Nutzen und die Wirkung auf die Präsenz abgewogen werden sollte. Denn trotz der Nachteile für die Präsenz gaben die Nutzer an, mit der Haptik mehr gelernt zu haben und hatten das Gefühl, alle Sinne zu nutzen, was bei dieser Anwendung das primäre Ziel war. So konnte trotz Reduktion der Präsenz durch die Haptik das Ziel erreicht werden.

3. Sofern haptisches Feedback die Immersion beeinflusst, welche Art erzeugt den größten Immersionseffekt?

Wie bereits festgestellt worden ist, hat die haptische Technologie einen Effekt auf die Immersion und Präsenz. Jedoch ist es schwer zu sagen, welches haptische Feedback für den größten Immersionseffekt sorgt. In dieser Arbeit wurden zwar verschiedene haptische Techniken verglichen, diese sind jedoch stark von der Umsetzung abhängig, wodurch jedes Modul wie bereits beschrieben gewisse Vor- und Nachteile für die insgesamt Präsenzwertung birgt. So erlaubt das Force Feedback eine glaubwürdige Darstellung der virtuellen Welt, stört jedoch durch das Exoskelett in der Ausführung einiger Bewegungen und durch die Lautstärke der Technik den auditiven Eindruck. Dies liegt an der technischen Umsetzung und kommt nicht durch den haptischen Eindruck zustande, verfälscht aber so den gesamten Eindruck, wodurch sich das Force Feedback nicht isoliert betrachten lässt. Das Gleiche gilt auch für die anderen Technologien. Dementsprechend konnte in dieser Arbeit keine genaue Antwort auf diese Frage gefunden werden. Insgesamt lässt sich aufzeigen, dass alle vorgestellten Technologien gewisse Vor- und Nachteile haben, die dann ihr gesamtes Potenzial ausschöpfen können, wenn sie richtig integriert wurden. Dementsprechend scheint keine haptische Technik per se für eine bessere Präsenzwertung zu sorgen als eine andere, sondern ist die Wertung stark von der richtigen Nutzung innerhalb der VR abhängig.

4. Ist der Aspekt der Individualisierung bei Haptik zu berücksichtigen?

Das vorgestellte VR-Gedächtnistraining bezieht sich spezifisch auf die Aspekte der Individualisierung, die insbesondere in dieser Studie evaluiert wurden. Die haptischen Eindrücke der Weste zum Codieren der Motive und Positionen wurden dabei sehr unterschiedlich wahrgenommen. Einige Personen empfanden die Haptik hilfreich, andere wiederum konnten sie nicht zuordnen und wieder andere empfanden die Vibrationsmuster als unpassend. Demnach war die Wahrnehmung sehr individuell, was darauf schließen lassen könnte, dass der Aspekt der Individualisierung auch die Haptik betrifft. Im Speziellen in einer Gedächtnistrainingsanwendung, in welcher die haptischen Reize unterstützen sollen, müssen diese gut auseinanderzuhalten sein. Wie sich dies auf die anderen haptischen Techniken auswirkt, konnte jedoch nicht genau erhoben werden. Auch hier wurde die Haptik teils sehr unterschiedlich wahrgenommen. Dies müsste in weiteren Studien untersucht werden, damit sicherzustellen ist, dass alle Nutzer einen gleich guten haptischen Eindruck vermittelt bekommen, der sie optimal unterstützt.

5. **Wie nehmen Nutzer die diversen haptischen Technologien an?**

Auch diese Frage ist nicht allgemeingültig zu beantworten, jedoch kann anhand der erhobenen Daten gesagt werden, dass alle in dieser Arbeit betrachteten haptischen Ergänzungen sehr gut von den Nutzern angenommen wurden. Die hohen Bewertungen sowie die Freitextfelder, die von den Probanden ausgefüllt wurden, gaben an, dass die Probanden die neue Technologie als sinnvoll ansehen und gerne mit dieser arbeiten würden. Bei dem direkten Vergleich der SenseGlove Nova und den Manus Prime X Haptic VR gaben zwar insgesamt mehr Personen an, dass sie die SenseGlove Nova bevorzugen würden, jedoch wurden beide Modelle auch hier gut bewertet. Die Tendenzen sprechen dafür, dass es keine großen Hemmungen gegenüber der Technik gibt. Dies müsste aber mit größeren Studiengruppen noch einmal genau untersucht werden, da auch innerhalb der Bewertungen teils sehr individuelle Meinungen aufgetreten sind, die durch eine größere Stichprobe abgeglichen werden könnten. Jedoch könnten die derzeitigen Ergebnisse vermuten lassen, dass durch die neue haptische Technologie auch Aspekte wie die Motivation insgesamt gesteigert wurden, was für den Therapiebereich besonders spannend wäre, da dadurch möglicherweise sogar Abbruchraten reduziert werden könnten.

6. **Hat die Haptik einen Einfluss auf die Effektivität der Therapie?**

Diese abschließende Frage ist sehr komplex und nicht einfach zu beantworten, dennoch können sich aus den bisher besprochenen Ergebnissen einige Tendenzen ableiten lassen, die womöglich bereits eine Richtung angeben. So konnte zusammenfassend gezeigt werden, dass die Technik sich gut in bereits bestehende therapeutische VR-Anwendungen integrieren lässt. Dies ist die Grundlage, die benötigt wird, um eine virtuelle Therapie überhaupt durch die neue haptische Technik ergänzen zu können. Ebenfalls konnten Effekte auf die Immersion und Präsenz festgestellt werden. Diese Aspekte sind von großer Bedeutung, um Gelerntes von der virtuellen Welt in die Realität zu übertragen. Dies ist ein Faktor, der entscheidend sein kann bei der Effektivität der Therapie. Hier haben alle Technologien noch einige Schwierigkeiten, die jedoch durch eine passendere Integration und weitere Forschung ausgeglichen werden könnten. Zusätzlich war die Akzeptanz der Probanden der Technik gegenüber sehr groß. Viele lobten die Technik im Freitext und wären bereit, die Anwendungen erneut zu nutzen. So scheint auch die Motivation möglicherweise durch diese neue Technologie gesteigert zu werden. Dies wiederum könnte zu verringerten Abbruchraten führen, die bei einigen Therapien immer noch ein großes

Problem darstellen. Auch die Möglichkeit neue Personengruppen wie haptische Lerner oder hörgeschädigte Menschen mit Anwendungen dieser Art anzusprechen, eröffnet neue Perspektiven, die durch weitere Studien und Anwendungsideen wegweisend bestimmt werden könnten.

Insgesamt scheint so tendenziell der Einfluss auf die Effektivität der Therapie gegeben, der sich über unterschiedliche Kanäle auswirkt. Wie stark der Einfluss ist und wie sich dieser optimal nutzen lässt, ist an diesem Punkt jedoch noch nicht klar und müsste durch weitere Forschung untersucht werden. Durch die neue und bereits verfügbare Technologie scheint es möglich zu sein, den Therapiebereich nachhaltig zu unterstützen. Dies ist ein abschließendes, positives Ergebnis.

14 Fazit

Wie bereits bei der Diskussion der Forschungsfragen deutlich geworden ist, scheint die Integration von haptischer Technologie eine tendenziell sinnvolle Ergänzung zu den derzeitigen virtuellen Therapien zu sein. Nicht nur können neue Personengruppen einbezogen werden, sondern kann die Therapie durch das Anregen zusätzlicher Sinne die Erfahrung insgesamt verbessern. Auch die bestehenden Forschungsarbeiten in diesem Themenfeld, welche im Kapitel 4 State of the Art vorgestellt wurden und experimentelle Technik verwenden, kommen zu vergleichbaren Ergebnissen. Auch hier konnte eine Steigerung der Präsenz und damit zum Beispiel eine Steigerung der Angst gemessen werden.

Diese Arbeit zeigt, dass diese Forschungsergebnisse nicht nur experimenteller Technologie, die für spezielle Anwendungen konzipiert ist, vorbehalten ist. Auch die derzeit bereits auf dem Markt befindliche haptische Technologien, die in dieser Arbeit betrachtet wurden, können zu ähnlichen Ergebnissen führen. Die Änderung der Immersion scheint durch alle getesteten Modelle belegt worden zu sein, die je nach Nutzung und Technologie auf andere Faktoren Einfluss nehmen.

Auch wenn an dieser Stelle die kleine Probandengruppengröße von zehn Personen berücksichtigt werden muss, die nicht repräsentativ für alle Personengruppen stehen kann, decken sich diese Ergebnisse mit den betrachteten aktuellen Forschungsarbeiten zu diesem Thema. Größere Probandengruppen und andere Altersbereiche müssen zeigen, ob diese Ergebnisse wirklich repräsentativ sind. Ebenfalls wurden innerhalb der Studien keine psychisch erkrankten Menschen einbezogen. Womöglich bedarf es hinsichtlich der Therapie zusätzliche Aspekte und Sicherheitskonzepte, die berücksichtigt werden müssten, um die Haptik sinnvoll zu integrieren.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich weitere interessante Aspekte, die für die Entwicklung mit haptischer Technologie wegweisend sein könnten. Darunter die individuelle Wahrnehmung der Haptik. Nicht alle Probanden empfanden insbesondere beim vibrotaktilen Feedback die Reaktion als passend. Die Stärke und Muster können unterschiedlich interpretiert werden, wodurch es möglicherweise zu fehlerhaften Einschätzungen kommen kann. Auch die sinnvolle Nutzung von haptischem Feedback in der virtuellen Welt sollte maßgeblich berücksichtigt werden, um die gewünschten Wirkungen zu erzeugen. Passt die Haptik nicht zum Geschehen, kann sie die Immersion und Präsenz negativ beeinflussen.

Von der technischen Seite aus sind die neuen Technologien sehr spannend und bieten viel Potenzial für Weiterentwicklung, die an einigen Stellen noch notwendig scheint. Aspekte wie Sicherheitskonzepte bei Elektroimpulsen oder die natürliche Darstellung der Hände in der virtuellen Welt sind notwendig, um optimale Ergebnisse zu ermöglichen. Dennoch sind die Techniken derzeit gut in Anwendungen einbindbar, insbesondere in *Unity*, da diese Entwicklungsschnittstelle für die meisten auf dem Markt befindlichen haptischen Technologien berücksichtigt wird. In den meisten Fällen sind die SDKs schnell und einfach einzubinden. An Dokumentationen und Tutorials wird stetig gearbeitet, jedoch wurde bei der Entwicklung deutlich, wie schnell und teilweise gravierend sich die Schnittstellen und Skripte während der Entwicklung verändern können. Dementsprechend ist es möglich, dass die derzeitig entwickelten Anwendungen nicht dauerhaft von der Technik unterstützt werden und möglicherweise angepasst werden müssen.

Insgesamt muss sich das Feld zu haptischen Technologien erweitern. Nicht nur um neue Technologien, sondern auch um Forschungsarbeiten, die sich auf die aktuell verfügbare Technik fokussieren. Diese Arbeit zeigt, dass es möglich ist, auch mit auf dem Markt verfügbarer Technologie sinnvoll zu forschen und diese in mögliche Therapiefelder zu überführen. Auch wenn es weiterhin Forschungsarbeiten zum Thema der Nutzbarkeit von VR-Therapie benötigt, so sind die derzeitigen Ergebnisse hinsichtlich der Wirksamkeit recht positiv einzustufen. Die auf dem Markt erwerbbar haptische Technologie kann es letztlich ermöglichen, dass haptische VR-Behandlungsmethoden nicht nur auf die Forschung beschränkt sind, sondern dass Praxen und andere medizinische Einrichtungen diese direkt zum Patienten bringen können.

15 Ausblick

Neben den Ergebnissen ergeben sich Fragen, die innerhalb dieser Arbeit nicht beantwortet oder behandelt werden konnten. Diese Fragen werden nun abschließend noch einmal diskutiert und eingeordnet, um wegweisende Ideen für die nächsten Jahre der Forschung geben zu können.

Ein wichtiger Bestandteil ist die Qualität der Forschung. Die Covid-19-Pandemie, die bestehende Chipknappheit und der Krieg zwischen der Ukraine und Russland, die alle parallel zu dieser Arbeit stattfinden oder stattgefunden haben, haben sich negativ auf diese Arbeit ausgewirkt. Dadurch war es abschließend nur möglich, Nutzbarkeitsstudien mit kleineren Probandengruppen zu den einzelnen Technologien umzusetzen. Der Plan wäre, die Studien noch einmal mit einer größeren und diverseren Gruppe an Personen zu wiederholen, um die Ergebnisse abzugleichen.

Des Weiteren wäre es sinnvoll, die Studien zum BAT mit haptischen Handschuhen mit Phobikern oder *ANTARES* mit haptischen Handschuhen mit suchterkrankten Personen zu wiederholen, um zu überprüfen, wie die Haptik auf erkrankte Personen wirkt und ob sich hierbei Unterschiede zu gesunden Probanden ergeben.

Auch stehen noch die Ergebnisse zur BAT-Studie mit Phobikern aus, welche die Controllerhaptik verwendet. Diese Studie ist zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen und muss noch ausführlich analysiert werden. Erste Ergebnisse sind nicht vor dem Dezember 2023 zu erwarten.

Auch stehen noch weitere Studien zu dem VR-Memory aus. Nicht nur die Betrachtung der einzelnen Wahrnehmungskanäle separat voneinander könnte weitere interessante Ergebnisse bringen, sondern auch die Verwendung von Haptikmuster, welcher der Tact-Suit X40 aus Musik generieren kann. Möglicherweise könnte dadurch die Immersion und Präsenz verbessert werden, da das Feedback dann auf die Musik abgestimmt ist und womöglich nicht mehr willkürlich scheint. Auch müsste geprüft werden, ob dieses Feedback für den Merkprozess sinnvoll ist und ob individuelle Muster möglicherweise trotz Verschlechterung der Immersion als hilfreicher wahrgenommen werden. Ein weiterer Aspekt ist die Individualisierung. Wie bereits in der Zusammenfassung besprochen, wurden Vibrationsmuster von Probanden unterschiedlich wahrgenommen. Hier müsste auf die Probanden eingegangen werden, um möglichst passende haptische Reize zu erstellen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Vereinheitlichung von haptischen Mustern innerhalb

von verschiedenster VR-Szenarien. Es ist zwar nicht möglich, für jede Eventualität ein einheitliches Muster zu verwenden, jedoch wäre es möglich, einige Signale wie ein Fehler durch eine kurze, starke Vibration zu codieren und eine Pause durch ein leichteres, längeres, verblissendes Signal. Würden solche Muster in Anwendungen einheitlich verwendet werden, wäre die Codierung dahinter für mehr Personen deutlich und würde weniger Raum für Fehlinterpretationen bieten. Dies würde jedoch noch einige Jahre dauern und würde nur spezielle Hardware betreffen. Zusätzlich wäre es noch denkbar, solche haptischen Muster von einer KI generieren zu lassen, um so die laufenden Anwendungen um passende haptische Eindrücke zu ergänzen.

Ein weiterer Gedanke, der sich während der Entwicklung ergab, war die Notwendigkeit von zusätzlichen Sicherheitsmechanismen. Nicht nur bezogen auf die Technologie selbst, wie bei dem TESLASUIT, wobei die Elektroimpulse selbst stoppen oder der Anzug eine weitere Notaus-Funktion bereitstellen sollte, sondern auch allgemein innerhalb der Programmanwendungen. Da bei Therapien mit erkrankten Personen gearbeitet wird, wäre es sinnvoll, immer die Möglichkeit bereitzustellen, die Haptik bei Überforderung abzustellen oder das Programm sofort zu beenden. Zwar besteht die Möglichkeit, die Brille abziehen, da jedoch auch Therapien mit z. B. Angstpatienten vollführt werden, die möglicherweise in einer Angstsituation nicht mehr klar denken können, sollte es weitere Optionen geben. Die VR besitzt die Möglichkeit, einen sofortigen Ortswechsel durchzuführen, weshalb es sinnvoll wäre, einen solchen Sicherheitsmechanismus zu nutzen, um die Person aus einer unangenehmen Situation zu holen. Dies könnte auch durch KI-basierte Techniken unterstützt werden. Durch Optionen wie das Messen von Pupillenerweiterungen, Puls und anderen physiologischen Indikatoren wäre es möglich, die Anwendung auf das Stressniveau des Patienten anzupassen. Davon könnte die VR-Therapie enorm profitieren, da so ebenfalls auf die individuellen Bedürfnisse eingegangen werden könnte und die Therapieintensität perfekt auf die Situation des Patienten abgestimmt wäre.

Insgesamt bietet das Themenfeld der Virtual Reality-Therapie noch ein enormes Potenzial, welches durch diese Arbeit kaum abgedeckt werden kann. Haptik ist nur eine Variable in diesem großen Konstrukt, die jedoch viel Potenzial bietet, die Therapien auf ein neues Level zu heben und womöglich weitere Therapiefelder zu erschließen, die bisher unberührt blieben, da sie nicht entsprechend umgesetzt werden konnten. Insbesondere Techniken wie das Force Feedback oder thermale Rückmeldungen könnten in den nächsten Jahren zu einer großen Innovation der Technik führen.

Glossar

BAT Der Behavioral Approach Test oder auch Behavioral Avoidance Test (BAT) ist ein Verfahren in der Verhaltenspsychologie, bei dem die Reaktionen einer Person auf angstauslösende Situationen beobachtet werden, um ihr Meidungsverhalten in Bezug auf bestimmte stimuli auszuwerten.. 63, 64, 185, 187–190, 192, 194, 196, 198, 200–202, 204, 207, 208, 212, 227

Cyber Sickness Cyber Sickness bezeichnet das Unwohlsein, Kopfschmerzen oder Übelkeit, die bei der Nutzung von Virtual Reality (VR) oder ähnlichen Technologien auftreten. Grund dafür ist eine Diskrepanz zwischen den visuellen Eindrücken und den wahrgenommenen Körperbewegungen.. 58, 99, 101

Expositionstherapie Die Expositionstherapie – auch Konfrontationstherapie – ist eine Methode der Verhaltenstherapie, zur Behandlung von Ängsten. Betroffenen werden in der Phantasie oder in der Realität mit den Dingen und Situationen stufenweise konfrontiert, vor denen sie Angst haben und die sie vermeiden.. 32, 62–64, 66, 67, 69, 71, 74, 112, 120, 123

Force Feedback Die Krafrückkopplung bezeichnet eine in Eingabegeräten eingesetzte Rückmeldung von Kraft an den Nutzer. 37, 47, 48, 51, 54, 56, 81–84, 86–89, 102, 104, 106, 108, 148, 156, 157, 162–165, 167, 178, 185, 189, 191, 199, 203, 213, 214, 220, 222, 228

Gamification Die Verwendung spiel-typischer Elemente in einem spiel-fremden Kontext zur Steigerung der Motivation.. 126

Multiple Errands Test (MET) Test zur Bewertung von Auswirkungen von Defiziten in den exekutiven Funktionen auf die alltägliche Funktionsfähigkeit anhand von alltäglichen Aufgaben. Die Aufgaben werden begleitet, unter Einhaltung bestimmter Regeln durchgeführt, wobei die Anzahl und Arten von Fehlern aufgezeichnet werden.. 75

Phobie Eine psychische Erkrankung, bei welcher Angst durch bestimmte Reize ausgelöst wird. Trotz der Einsicht der Betroffenen, dass es sich um eine irrationale Angst handelt können Sie ihre Reaktion nicht steuern. Weit verbreitet sind z.B. die Angst vor Spinnen (Arachnophobie), die Angst vor großen Plätzen (Agoraphobie) oder

die Angst vor engen Räumlichkeiten wie z. B. Fahrstühlen (Klaustrophobie). 63–65, 71

Prolongierte Exposition Die Prolongierte Exposition wurde von Edna B. Foa und Kollegen entwickelt. Dabei werden die Betroffenen nach umfassender spezifischer Psychoedukation dazu angeleitet, sich sowohl den Traumaerinnerungen durch wiederholte länger anhaltende imaginative Exposition (in-sensu) zu zuwenden, als auch realen Situationen, welche bisher angstbedingt vermieden wurden (Exposition in-vivo) [336].. 69, 70

Rezeptoren Ende einer Nervenfaser oder spezialisierten Zelle, die Reize aufnehmen und in Erregungen umwandeln kann. . 10–15, 20, 53

Synapsen Der Übertragung von Reizen dienende Verbindung zwischen einer Nerven- oder Sinneszelle und einer anderen Nervenzelle oder einem Muskel. . 14, 34

Akronyme

AR Augmented Reality. 1, 7, 17, 38, 39, 45, 61, 63, 64, 71, 77, 79, 82, 86, 92, 97, 210

HMD Head-Mounted Display. 19, 36–39, 45, 47, 51, 58, 61, 94, 100, 101, 107, 117, 139, 174, 177, 185, 192, 200

IDE Integrated Development Environment. 39

SDK Software Development Kit. 5, 82, 85, 86, 92, 95, 115–117, 120, 127, 151, 155, 157, 163, 167, 211, 212, 226

VR Virtual Reality. 1, 3, 5–7, 17–19, 35–39, 41, 45, 48, 50, 51, 54, 57–59, 61–63, 65–71, 73–77, 79, 82, 85–87, 91–95, 97, 99–109, 114, 115, 117, 123, 124, 126, 127, 130, 132, 133, 135, 147, 149, 151, 153, 154, 159–161, 165, 168, 169, 171, 175, 181, 185–187, 189, 190, 197, 198, 200, 207–210, 212, 214, 216, 217, 222, 223, 226–228

Literaturverzeichnis

- [1] Actronika. *Innovative tools for creators*. 2023. URL: <https://www.skinetic.actronika.com/> (besucht am 13.07.2023).
- [2] ADP e.V. *Funktion | ADP e.V.* 2022. URL: <https://www.unsererahaut.de/de/unsere-haut/Funktion.php> (besucht am 26.01.2022).
- [3] Page L. Anderson u. a. „Virtual reality exposure therapy for social anxiety disorder: a randomized controlled trial“. In: *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 81.5 (2013), S. 751–760. ISSN: 1939-2117. DOI: 10.1037/a0033559.
- [4] Frank Antwerpes, Natascha Van den Höfel und Fiona Walter. *Hautanhangsgebilde - DocCheck Flexikon*. 2022. URL: <https://flexikon.doccheck.com/de/Hautanhangsgebilde> (besucht am 26.01.2022).
- [5] Frank Antwerpes, Natascha Van den Höfel und Fiona Walter. *Thermorezeptor - DocCheck Flexikon*. 2022. URL: <https://flexikon.doccheck.com/de/Thermorezeptor> (besucht am 26.01.2022).
- [6] AOK - Die Gesundheitskasse. „Warum haben Menschen Angst vor Spinnen?“ In: *AOK - Die Gesundheitskasse* (2023). URL: <https://www.aok.de/pk/magazin/koerper-psyche/psychologie/warum-haben-menschen-angst-vor-spinnen/> (besucht am 02.08.2023).
- [7] App Store. *PHOBOS AR*. 2022. URL: <https://apps.apple.com/us/app/phobos-ar/id1281732065> (besucht am 28.02.2022).
- [8] Lora Appel u. a. „Virtual Reality for Veteran Relaxation (VR2) – Introducing VR-Therapy for Veterans With Dementia – Challenges and Rewards of the Therapists Behind the Scenes“. In: *Frontiers in Virtual Reality* 2 (2021). DOI: 10.3389/frvir.2021.720523.
- [9] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. *Mentale Gesundheit und kognitive Leistungsfähigkeit - Arbeit und kognitive Leistungsfähigkeit*. 2023. URL: <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeit-und-Gesundheit/Psychische-Gesundheit/Mentale-Gesundheit-und-kognitive-Leistungsfähigkeit/Arbeit-Leistungsfähigkeit.html> (besucht am 24.02.2023).

- [10] Benjamin Thorup Arnfred u. a. „Virtual reality exposure in cognitive behavioral group therapy for social anxiety disorder: A qualitative evaluation based on patients’ and therapists’ experiences“. In: *Translational Issues in Psychological Science* 7.3 (2021), S. 229–247. ISSN: 4338-9500. DOI: 10.1037/tps0000291. URL: <https://psycnet.apa.org/doiLanding?doi=10.1037/tps0000291>.
- [11] Arif Bacchus. „This futuristic haptic vest should make virtual reality feel more realistic“. In: *Digital Trends* (2021). URL: <https://www.digitaltrends.com/computing/acronika-haptic-vest-skinetic-vr-more-realistic/> (besucht am 29.12.2021).
- [12] Siyeon Baik, Shinsuk Park und Jaeyoung Park. „Haptic Glove Using Tendon-Driven Soft Robotic Mechanism“. In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020), S. 541105. ISSN: 2296-4185. DOI: 10.3389/fbioe.2020.541105. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.541105/full>.
- [13] Matthias Bastian. „Magic Leap 2: Neue Details zur Technik“. In: *MIXED* (2022). URL: <https://mixed.de/magic-leap-2-neue-details-zur-technik/> (besucht am 09.03.2022).
- [14] Matthias Bastian. „Magic Leap: Wert des Unternehmens im freien Fall“. In: *MIXED* (2020). URL: <https://mixed.de/magic-leap-wert-des-unternehmens-im-freien-fall/> (besucht am 09.03.2022).
- [15] BeBop Sensors. *AR/VR | Haptic Gloves | BeBop Sensors*. 2022. URL: <https://bebopsensors.com/arvr/> (besucht am 14.09.2022).
- [16] BeBop Sensors. *BeBop Sensors Announces World’s First Haptic Glove Designed Exclusively For Oculus Quest™ Forte Data Glove with Oculus Quest Controller - BeBop Sensors*. 2019. URL: <https://bebopsensors.com/bebop-sensors-announces-worlds-first-haptic-glove-designed-exclusively-for-oculus-quest-forte-data-glove-with-oculus-quest-controller/> (besucht am 14.09.2022).
- [17] BeBop Sensors. *Discover - BeBop Sensors*. 2021. URL: <https://bebopsensors.com/developers/discover/> (besucht am 05.01.2022).
- [18] BeBop Sensors. *Forte Glove | Software Toolkit | BeBop Sensors*. 2021. URL: <https://bebopsensors.com/developers/forte/> (besucht am 23.03.2023).

- [19] Christian Becker-Carus und Mike Wendt. „Auditorisches System und weitere Wahrnehmungssysteme“. In: *Allgemeine Psychologie*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017. Kap. 4.3.1.1 Taktile Wahrnehmung, S. 157–196. DOI: 10.1007/978-3-662-53006-1_4. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53006-1_4.
- [20] Tomislav Bezmalinovic. „HaptX Gloves G1: Highend-Haptik wird besser und günstiger“. In: *MIXED* (2022). URL: <https://mixed.de/haptx-gloves-g1-highend-haptik-wird-besser-und-guenstiger/> (besucht am 24.03.2023).
- [21] Tomislav Bezmalinovic. „Mit diesem VR-Controller spürt ihr jeden Schwertstreich“. In: *MIXED* (2020). URL: <https://mixed.de/mit-diesem-vr-controller-spuert-ihr-jeden-schwertstreich/> (besucht am 24.03.2023).
- [22] bHaptics. *Forty feedback points,unforgettable experiences*. 2023. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactsuit-x40> (besucht am 29.04.2023).
- [23] bHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. 2021. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/compare> (besucht am 29.12.2021).
- [24] bHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. 2021. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactosy-for-arms> (besucht am 29.12.2021).
- [25] bHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. 2021. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactosy-for-hands> (besucht am 29.12.2021).
- [26] bHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. 2021. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactosy-for-feet> (besucht am 29.12.2021).
- [27] bHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. 2023. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactglove> (besucht am 03.08.2023).
- [28] bHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. 2023. URL: <https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactvisor> (besucht am 04.08.2023).
- [29] Microsoft Devices Blog. *Announcing Microsoft HoloLens Development Edition open for pre-order, shipping March 30*. 2016. URL: <https://blogs.windows.com/devices/2016/02/29/announcing-microsoft-hololens-development-edition-open-for-pre-order-shipping-march-30/> (besucht am 09.03.2022).

- [30] Jens Boenigk, Hrsg. *Boenigk, Biologie: Der begleiter in und durch das studium*. 1. Aufl. 2021. [S.l.]: Springer, 2021. Kap. 17, S. 410–415. ISBN: 9783662612705. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-61270-5>.
- [31] Cristina Botella u. a. „Treating cockroach phobia with augmented reality“. In: *Behavior therapy* 41.3 (2010), S. 401–413. DOI: 10.1016/j.beth.2009.07.002.
- [32] Stéphane Bouchard u. a. „Virtual reality compared with in vivo exposure in the treatment of social anxiety disorder: a three-arm randomised controlled trial“. In: *The British journal of psychiatry : the journal of mental science* 210.4 (2017), S. 276–283. DOI: 10.1192/bjp.bp.116.184234.
- [33] Jack Brooks und Jörg Trojan. „The Cutaneous Rabbit Effect: Phenomenology and saltation“. In: *Scholarpedia* 12.12 (2017), S. 52363. DOI: 10.4249/scholarpedia.52363.
- [34] Bundesgesundheitsministerium. *Essstörungen*. 2022. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/service/begriffe-von-a-z/e/essstoerungen.html> (besucht am 03.08.2022).
- [35] Simon Burbach, Annika Steiger und Christian Gießer. „Suitability Testing of the LucidGloves Prototype 4 for Extended Reality Medical Teaching“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 8.2 (2022), S. 419–422. DOI: 10.1515/cdbme-2022-1107.
- [36] CamSoda. *Camsoda and Realdoll Virtual Intercourse*. 2022. URL: <https://www.camsoda.com/labs/virtualsex/> (besucht am 14.01.2022).
- [37] Leonardo Cappello u. a. „Continuous supplementary tactile feedback can be applied (and then removed) to enhance precision manipulation“. In: *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 17.1 (2020), S. 120. DOI: 10.1186/s12984-020-00736-9.
- [38] CES. *Innovation Award Honorees*. 2023. URL: <https://www.ces.tech/innovation-awards/honorees/2022/honorees/o/owo-haptic-vest.aspx> (besucht am 24.03.2023).
- [39] *CGTrader - 3D Models for VR / AR and CG projects*. 2022. URL: <https://www.cgtrader.com/> (besucht am 20.04.2022).
- [40] Christian Hanshans u. a. *Virtual Therapeutics -Requirements to deliver value with virtual reality and biofeedback applications for alcohol addiction therapy*. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.30802.68801.

- [41] Contact CI. *Feel The Unreal*. 2023. URL: <https://contact.ci/#top> (besucht am 13.07.2023).
- [42] Julia Ciążyńska und Janusz Maciaszek. „Various Types of Virtual Reality-Based Therapy for Eating Disorders: A Systematic Review“. In: *Journal of clinical medicine* 11.17 (2022). ISSN: 2077-0383. DOI: 10.3390/jcm11174956.
- [43] Guangzhou Zhuoyuan Virtual Reality Tech Co. *9D VR Cinema Virtual Reality Simulator VR Game Chair Egg Machine*. 2022. URL: <https://www.funinvrstar.com/> (besucht am 06.01.2022).
- [44] Guangzhou Zhuoyuan Virtual Reality Tech Co. *VR BattleShip 9D Game Machine*. 2022. URL: <https://www.funinvrstar.com/vr-battleship-9d-vr-game-machine/> (besucht am 06.01.2022).
- [45] COVID-19 Mental Disorders Collaborators. „Global prevalence and burden of depressive and anxiety disorders in 204 countries and territories in 2020 due to the COVID-19 pandemic“. In: *Lancet (London, England)* 398.10312 (2021), S. 1700–1712. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)02143-7.
- [46] Elen Collaço u. a. „Immersion and haptic feedback impacts on dental anesthesia technical skills virtual reality training“. In: *Journal of dental education* 85.4 (2021), S. 589–598. DOI: 10.1002/jdd.12503.
- [47] Jonny Collins, Holger Regenbrecht und Tobias Langlotz. „Expertise and Experience in VR-supported learning: Achieving a deep non-verbal comprehension of four-dimensional space“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 152 (2021), S. 102649. ISSN: 10715819. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2021.102649.
- [48] MM-Company. *MMOne Project*. 2022. URL: <http://mm-company.com/> (besucht am 06.01.2022).
- [49] *Contact CI*. 2022. URL: <https://contact.ci/#maestro-product> (besucht am 12.04.2022).
- [50] *Controller | VIVE Deutschland*. 2022. URL: <https://www.vive.com/de/accessory/controller/> (besucht am 13.04.2022).
- [51] Coolsten. *Teslasuit – Der VR Ganzkörper-Feedback Anzug | coolsten*. 2021. URL: <https://coolsten.de/teslasuit-virtual-reality-anzug/> (besucht am 29.12.2021).
- [52] Plexus Immersive Corp. *Plexus/High-performance VR/AR Gloves*. 2021. URL: <http://plexus.im/> (besucht am 05.01.2022).

- [53] Cybershoe. *CybershoesWebsite*. 2023. URL: <https://www.cybershoes.com/product/cybershoes-for-quest-steamvr/> (besucht am 13.07.2023).
- [54] Cybershoes US. *Cybershoes US - Shoes made for walking in VR*. 2023. URL: <https://www.cybershoes.com/> (besucht am 19.08.2023).
- [55] DAK. „PowerPoint-Präsentation“. In: (). URL: <https://www.dak.de/dak/download/report-2429408.pdf> (besucht am 20.02.2023).
- [56] Danielfib. *MySoundtrack*. 2023. URL: <https://assetstore.unity.com/packages/audio/music/mysoundtrack-197430> (besucht am 10.06.2023).
- [57] Laura Dellazizzo u. a. „Evidence on Virtual Reality-Based Therapies for Psychiatric Disorders: Meta-Review of Meta-Analyses“. In: *Journal of Medical Internet Research* 22.8 (2020), e20889. ISSN: 1438-8871. DOI: 10.2196/20889.
- [58] Julia Diemer u. a. „Virtual reality exposure in anxiety disorders: impact on psychophysiological reactivity“. In: *The world journal of biological psychiatry : the official journal of the World Federation of Societies of Biological Psychiatry* 15.6 (2014), S. 427–442. DOI: 10.3109/15622975.2014.892632.
- [59] Joann Difede u. a. „Enhancing exposure therapy for posttraumatic stress disorder (PTSD): a randomized clinical trial of virtual reality and imaginal exposure with a cognitive enhancer“. In: *Translational Psychiatry* 12.1 (2022), S. 299. ISSN: 2158-3188. DOI: 10.1038/s41398-022-02066-x. URL: <https://www.nature.com/articles/s41398-022-02066-x#citeas>.
- [60] Horst Dilling und Christian Reimer. „Psychotherapie“. In: *Psychiatrie und Psychotherapie*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997, S. 231–250. DOI: 10.1007/978-3-662-22360-4_16. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-22360-4_16.
- [61] *DIMDI - ICD-10-GM Version 2009*. 2020. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2009/block-f40-f48.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [62] *DIMDI - ICD-10-GM Version 2013*. 2020. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2013/block-f20-f29.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [63] *DIMDI - ICD-10-GM Version 2013*. 2020. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2013/block-f30-f39.htm> (besucht am 20.02.2023).

- [64] DIMDI - ICD-10-GM Version 2013. 2020. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2013/block-f40-f48.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [65] DIMDI - ICD-10-GM Version 2015. 2022. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2015/block-f40-f48.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [66] DIMDI - ICD-10-GM Version 2018. 2022. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2018/block-f50-f59.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [67] DIMDI - ICD-10-GM Version 2018. 2023. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2018/block-f10-f19.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [68] DIMDI - ICD-10-GM Version 2019. 2019. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2019/block-f40-f48.htm> (besucht am 20.02.2023).
- [69] DocCheck Medical Services GmbH. *Angststörung - DocCheck Flexikon*. 2022. URL: <https://flexikon.doccheck.com/de/Angstst%C3%B6rung> (besucht am 03.08.2022).
- [70] R. Dörner u. a. *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN: 9783662588611. URL: <https://books.google.de/books?id=wpCyDwAAQBAJ>.
- [71] Red Dot. *Red Dot Design Award: Teslasuit*. 2021. URL: <https://www.red-dot.org/de/project/teslasuit-37070> (besucht am 28.12.2021).
- [72] Devakshi Dua, Gopika Jagota und Sandeep Grover. „Management of obsessive-compulsive disorder with virtual reality-based exposure“. In: *Industrial psychiatry journal* 30.1 (2021), S. 179–181. ISSN: 0972-6748. DOI: 10.4103/ipj.ipj_33_19.
- [73] Duden. *Haut als Sinnesorgan in Biologie | Schülerlexikon | Lernhelfer*. 2022. URL: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/biologie/artikel/haut-als-sinnesorgan#> (besucht am 26.01.2022).
- [74] Tanja Joan Eiler u. a. „Improving the Approach-Avoidance Task in Virtual Reality Through Presence and Virtual Risk Situations“. In: (2021), S. 184–188. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00041.

- [75] Tanja Joan Eiler u. a. „Virtual and Augmented Reality for Digital Medicine - Design and Implementation of a Hybrid, Interdisciplinary Course for Engineering and Medical Students“. In: IEEE, 2023. DOI: 10.1109/EDUCON54358.2023.10125163. URL: <https://doi.org/10.1109/EDUCON54358.2023.10125163>.
- [76] Ekto VR. *EKTO VR: Virtual Reality Training with Robotics*. 2022. URL: <https://ektovr.com/> (besucht am 19.07.2022).
- [77] Paul M. G. Emmelkamp und Katharina Meyerbröker. „Virtual Reality Therapy in Mental Health“. In: *Annual review of clinical psychology* 17 (2021), S. 495–519. DOI: 10.1146/annurev-clinpsy-081219-115923.
- [78] N. Engelmann. *Virtual Reality Gaming: Potential der Technologie für die Welt der digitalen Spiele*. Tectum Wissenschaftsverlag, 2018. ISBN: 9783828870611. URL: <https://books.google.de/books?id=eAd4DwAAQBAJ>.
- [79] EPFL. *DextrES*. 2022. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3242587.3242657> (besucht am 14.01.2022).
- [80] Josef Erl. „Virtual Reality: Dieses Haptik-Shirt geht an die Schmerzgrenze“. In: *MIXED* (2021). URL: <https://mixed.de/virtual-reality-dieses-haptik-shirt-geht-an-die-schmerzgrenze/?amp=1> (besucht am 29.12.2021).
- [81] L. V. Eshuis u. a. „Efficacy of immersive PTSD treatments: A systematic review of virtual and augmented reality exposure therapy and a meta-analysis of virtual reality exposure therapy“. In: *Journal of psychiatric research* 143 (2021), S. 516–527. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2020.11.030.
- [82] Evan Strasnick u. a. „Haptic Links: Bimanual Haptics for Virtual Reality Using Variable Stiffness Actuation“. In: *CHI 2018/SIGCHI 2018* (2018). URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/haptic-links-bimanual-haptics-for-virtual-reality-using-variable-stiffness-actuation-2/>.
- [83] exiii | Haptic Wearable Technology for XR. *exiii | Wearable Haptic Tech for VR & AR*. 2022. URL: <https://exiii.jp/> (besucht am 05.01.2022).
- [84] Simon Falk und Susanne Fritz. *Wie beeinflusst das Sehen die haptische Wahrnehmung von Leder und Kunstlederflächen? (VisioHap)*. 2022. URL: <https://www.filkfreiberg.de/support/aktuelles/wie-beeinflusst-das-sehen-die-haptische-wahrnehmung-von-leder-und-kunstlederflächen-visiohap> (besucht am 08.02.2022).

- [85] Peter Falkai, Hrsg. *Diagnostisches und Statistisches Manual Psychischer Störungen - DSM-5* ®. Göttingen, Bern und Wien: Hogrefe, 2015. ISBN: 9783840925993. URL: <http://elibrary.hogrefe.de/9783840925993/U1>.
- [86] Zhang Fang. „Wireality: Enabling Complex Tangible Geometries in Virtual Reality with Worn Multi-String Haptics“. In: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Hrsg. von Regina Bernhaupt. ACM Digital Library. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2020, S. 1–10. ISBN: 9781450367080. DOI: 10.1145/3313831.3376470.
- [87] Feelbelt. *Feelbelt | Fühle, was du hörst | Haptic Feedback 2.0*. 2021. URL: <https://feelbelt.de/de/entdecke-feelbelt/> (besucht am 29.12.2021).
- [88] *Force Jacket: Pneumatically-Actuated Jacket for Embodied Haptic Experiences – Disney Research*. 2022. URL: <https://la.disneyresearch.com/publication/force-jacket/> (besucht am 05.01.2022).
- [89] Blender Foundation. *Home of the Blender project*. 2022. URL: <https://www.blender.org/> (besucht am 09.03.2022).
- [90] Anna Francova u. a. „Virtual Reality Exposure Therapy in Patients with Obsessive-Compulsive Disorder“. In: *ICVR 2019*. Piscataway, NJ: IEEE, 2019, S. 1–2. ISBN: 978-1-7281-1285-5. DOI: 10.1109/ICVR46560.2019.8994404.
- [91] Franz Resch. „Was ist eine psychische Störung?“ In: *Springer Medizin Verlag GmbH & Springer Verlag GmbH, Teile von SpringerNature* (2020). URL: https://www.springermedizin.de/emedpedia/psychiatrie-und-psychotherapie-des-kindes-und-jugendalters/was-ist-eine-psychische-stoerung?epediaDoi=10.1007%2F978-3-662-49289-5_54 (besucht am 03.08.2022).
- [92] Frederic Vester. *Denken, Lernen, Vergessen*. 25. Aufl. Dt. Taschenbuch-Verlag, 1998. ISBN: 3423330457.
- [93] D. Freeman, S. Lambe und T. Kabir. *gameChange — Department of Psychiatry*. 2022. URL: <https://www.psych.ox.ac.uk/research/oxford-cognitive-approaches-to-psychosis-o-cap/projects-1/gameChange> (besucht am 01.08.2022).
- [94] D. Freeman u. a. „Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders“. In: *Psychological medicine* 47.14 (2017), S. 2393–2400. DOI: 10.1017/S003329171700040X. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/psychological-medicine/article/virtual-reality-in-the->

assessmentunderstanding-and-treatment-of-mental-health-disorders/
A786FC699B11F6A4BB02B6F99DC20237.

- [95] Daniel Freeman u. a. „Automated virtual reality therapy to treat agoraphobic avoidance and distress in patients with psychosis (gameChange): a multicentre, parallel-group, single-blind, randomised, controlled trial in England with mediation and moderation analyses“. In: *The lancet. Psychiatry* 9.5 (2022), S. 375–388. DOI: 10.1016/S2215-0366(22)00060-8.
- [96] Uniklinik Freiburg. *Die Angst vor Spinnen in den Griff kriegen | Universitätsklinikum Freiburg*. 2022. URL: <https://www.uniklinik-freiburg.de/presse/publikationen/im-fokus/2020/die-angst-vor-spinnen-in-den-griff-kriegen.html> (besucht am 19.04.2022).
- [97] Paula Frieden, Ralph Koelle und Stefanie Elbeshausen. *Physiologische Werte zur Messung der Präsenz in virtuellen Welten*. 2018. DOI: 10.18420/muc2018-mci-0423.
- [98] Claudia Füssler. „Arachnophobie: Die Angst vor Spinnen“. In: *planet-wissen.de* (2015). URL: https://www.planet-wissen.de/natur/insekten_und_spinnentiere/spinnen/pwiearachnophobieangstvorspinnen100.html (besucht am 13.09.2022).
- [99] Josephine Galey. „Synapsen – Aufbau und die Funktion der Reizweiterleitung einfach erklärt“. In: *Nachhilfe-Team.net* (2021). URL: <https://www.nachhilfe-team.net/lernen-leicht-gemacht/synapsen/> (besucht am 28.01.2022).
- [100] Tian Gao u. a. „Exploring Psychophysiological Restoration and Individual Preference in the Different Environments Based on Virtual Reality“. In: *International journal of environmental research and public health* 16.17 (2019). DOI: 10.3390/ijerph16173102.
- [101] García-Batista u. a. „Design and Validation of Augmented Reality Stimuli for the Treatment of Cleaning Obsessive-Compulsive Disorder“. In: *Frontiers in psychology* 12 (2021), S. 618874. ISSN: 1664-1078. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.618874.
- [102] Gonzalo Garcia-Valle u. a. „Evaluation of Presence in Virtual Environments: Haptic Vest and User’s Haptic Skills“. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 7224–7233. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2782254.

- [103] Alexander L. Gerlach. *Verhaltenstherapie, kognitive Verhaltenstherapie im Dorsch Lexikon der Psychologie*. 2019. URL: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/verhaltenstherapie-kognitive-verhaltenstherapie>.
- [104] Franz Gerrer. *Epidermis (Oberhaut) // Med-koM*. 2022. URL: <https://www.medizin-kompakt.de/epidermis> (besucht am 26.01.2022).
- [105] Franz Gerrer. *Lederhaut (Dermis, Corium) // Med-koM*. 2022. URL: <https://www.medizin-kompakt.de/lederhaut-dermis-> (besucht am 26.01.2022).
- [106] Franz Gerrer. *Unterhaut (Subcutis) // Med-koM*. 2022. URL: <https://www.medizin-kompakt.de/unterhaut-subcutis-> (besucht am 26.01.2022).
- [107] Bundesministerium für Gesundheit. *Online-Ratgeber Demenz*. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/pflege/online-ratgeber-demenz/krankheitsbild-und-verlauf.html> (besucht am 02.08.2023).
- [108] *Get Started with Unity | Magic Leap*. 2022. URL: <https://developer.magicleap.com/en-us/learn/guides/get-started-developing-in-unity> (besucht am 03.03.2022).
- [109] Janet K. Gibbs, Marco Gillies und Xueni Pan. „A comparison of the effects of haptic and visual feedback on presence in virtual reality“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 157 (2022), S. 102717. ISSN: 10715819. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2021.102717.
- [110] Christian Gießer u. a. „Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in medical applications – an overview: German Medical Science GMS Publishing House“. In: *73. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie (DGNC), Joint Meeting mit der Griechischen Gesellschaft für Neurochirurgie* (2022). DOI: 10.3205/22dgnc317.
- [111] Christian Giesser u. a. „EIT-based Gesture Recognition Training with Augmented Reality“. In: (2021), S. 198–200. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00044.
- [112] Christian Giesser u. a. „SkillsLab+ - Augmented Reality Enhanced Medical Training“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. IEEE, 2021, S. 194–197. ISBN: 978-1-6654-3225-2. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00043.
- [113] Sanofi-Aventis Deutschland GmbH. *Die 5 Sinne am Beginn des Lebens*. 2022. URL: <https://mein.sanofi.de/themen/sinne/die-5-sinne-am-beginn-des-lebens> (besucht am 08.02.2022).

- [114] Studienkreis GmbH. *Aufbau einer Nervenzelle*. 2022. URL: <https://www.studienkreis.de/biologie/nervenzelle-aufbau/> (besucht am 28.01.2022).
- [115] Google. *Google Cardboard – Google VR*. 2021. URL: <https://arvr.google.com/cardboard/> (besucht am 09.03.2022).
- [116] Google. *US20180108226A1 - Skin stretch instrument - Google Patents*. 2022. URL: <https://patents.google.com/patent/US20180108226A1/en> (besucht am 05.01.2022).
- [117] Florian Grensing u. a. „Abstracts of the 2022 Joint Annual Conference of the Austrian (ÖGBMT), German (VDE DGBMT) and Swiss (SSBE) Societies for Biomedical Engineering, including the 14th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation“. In: Bd. 67. s1. 2022. DOI: 10.1515/bmt-2022-2001.
- [118] Florian Grensing u. a. „Abstracts of the 2022 Joint Annual Conference of the Austrian (ÖGBMT), German (VDE DGBMT) and Swiss (SSBE) Societies for Biomedical Engineering, including the 14th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation“. In: Bd. 67. s1. 2022. DOI: 10.1515/bmt-2022-2001.
- [119] Florian Grensing u. a. „Training Application for Ostomy Patients in Virtual Reality“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. IEEE, 2021, S. 210–214. ISBN: 978-1-6654-3225-2. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00048.
- [120] Armin Grunewald u. a. „Virtual Reality Training Application to Prepare Medical Student’s for Their First Operating Room Experience“. In: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00045.
- [121] Martin Grunwald und Lothar Beyer, Hrsg. *Der bewegte Sinn: Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Basel: Birkhäuser, 2001. ISBN: 978-3-7643-6516-5.
- [122] José Gutiérrez-Maldonado, Joana Pla-Sanjuanelo und Marta Ferrer-García. „Cue-exposure software for the treatment of bulimia nervosa and binge eating disorder“. In: *Psicothema* 28.4 (2016), S. 363–369. DOI: 10.7334/psicothema2014.274.
- [123] Half-Life. *Half-Life: Alyx*. 2023. URL: <https://www.half-life.com/de/alyx/> (besucht am 14.08.2023).

- [124] Tactical Haptics. „Press release: sabergrip brings the physical in-hand experiences of virtual fishing, sword fighting, and tool training one step closer to reality“. In: *Tactical Haptics* (2020). URL: <https://tacticalhaptics.com/sabergrip-sword-fishing-press-release/> (besucht am 19.07.2022).
- [125] HaptX. *Haptic gloves for virtual reality and robotics / HaptX*. 2021. URL: <https://haptx.com/> (besucht am 05.01.2022).
- [126] Jamie Lee Harder u. a. „Überregionale telemedizinische Ergänzungsbehandlung für die ländliche Hausarztversorgung - eine Mixed-Methods-Analyse“. In: *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen* 169 (2022), S. 67–74. DOI: 10.1016/j.zefq.2021.12.008.
- [127] Olaf Hartmann. *Haptik als Beziehungsinstrument*. 2022. URL: <https://www.touchmore.de/blog/verkaufsfoerderung/item/haptik-als-beziehungsinstrument> (besucht am 08.02.2022).
- [128] Mental Health und Substance Use. „World mental health report: Transforming mental health for all“. In: *World Health Organization* (2022). URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240049338> (besucht am 20.02.2023).
- [129] Prof. Hecken. *Beschluss des Gemeinsamen Bundesausschusses über die Freigabe des Berichts des IQTIG zur Veröffentlichung: Qualitätssicherungsverfahren zur ambulanten psychotherapeutischen Versorgung gesetzlich Krankenversicherter*. 2022. URL: https://www.g-ba.de/downloads/39-261-5351/2022-03-18_IQTIG-Veroeffentlichung-Abschlussbericht-ambulante-psychotherapeutische-Versorgung.pdf.
- [130] Matthew J. Hertenstein u. a. „The communication of emotion via touch“. In: *Emotion (Washington, D.C.)* 9.4 (2009), S. 566–573. ISSN: 1528-3542. DOI: 10.1037/a0016108.
- [131] Jonas Hinze u. a. „Spider Phobia: Neural Networks Informing Diagnosis and (Virtual/Augmented Reality-Based) Cognitive Behavioral Psychotherapy-A Narrative Review“. In: *Frontiers in psychiatry* 12 (2021), S. 704174. ISSN: 1664-0640. DOI: 10.3389/fpsy.2021.704174.
- [132] *History — blender.org*. 2022. URL: <https://www.blender.org/about/history/> (besucht am 09.03.2022).
- [133] HJW. *Immersion*. URL: <https://filmlexikon.uni-kiel.de/index.php?action=lexikon&tag=det&id=942> (besucht am 12.11.2019).

- [134] HoloSuit. *HoloSuit*. 2021. URL: <https://www.holosuit.com/holosuit> (besucht am 29. 12. 2021).
- [135] HTC. *The professional-grade VR headset | VIVE Pro Deutschland*. 2022. URL: <https://www.vive.com/de/product/vive-pro/> (besucht am 07. 06. 2022).
- [136] Fabian Hutmacher und Christof Kuhbandner. „Long-Term Memory for Haptically Explored Objects: Fidelity, Durability, Incidental Encoding, and Cross-Modal Transfer“. In: *Psychological science* 29.12 (2018), S. 2031–2038. DOI: 10.1177/0956797618803644.
- [137] ICAROS. *ICAROS Home*. 2022. URL: <https://shop.icaros.com/ICAROS-Home/201000018134> (besucht am 06. 01. 2022).
- [138] Igroup.org. *igroup presence questionnaire (IPQ) Item Download | igroup.org – project consortium*. 2023. URL: <http://www.igroup.org/pq/ipq/download.php#German> (besucht am 12. 06. 2023).
- [139] Kiran Ijaz, Jacqueline Thomas und Naseem Ahmadpour. „Immersive VR Learning Experiences: Do Expectations Meet Reality?“ In: Dez. 2018. ISBN: 978-1-4503-6188-0. URL: https://www.researchgate.net/publication/332071266_Immersive_VR_Learning_Experiences_Do_Expectations_Meet_Reality.
- [140] Inc Immerz. *KOR-FX 4DFX Haptic Gaming Vest*. 2021. URL: <http://www.korfx.com/de/> (besucht am 29. 12. 2021).
- [141] Inrak Choi u. a. „CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality“. In: *CHI 2018* (2018). URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/claw-multifunctional-handheld-virtual-reality-haptic-controller/>.
- [142] „Inside Reality Labs Research: Bringing Touch to the Virtual World“. In: *Meta* (2021). (Besucht am 13. 08. 2023).
- [143] Andreea Iosa. „Rollschuhe statt Laufstall: So läuft man in der virtuellen Realität“. In: *futurezone.at* (2019). URL: <https://futurezone.at/start-ups/rollschuhe-statt-laufstall-so-laeuft-man-in-der-virtuellen-realitaet/400545938> (besucht am 19. 07. 2022).
- [144] Kamila R. Irvine u. a. „Using immersive virtual reality to modify body image“. In: *Body Image* 33 (2020), S. 232–243. ISSN: 1740-1445. DOI: 10.1016/j.bodyim.2020.03.007.

- [145] Ivan E. Sutherland. *A Head-Mounted-ThreeDimensional Display*. University of Utah, 1968. URL: <https://www.cise.ufl.edu/research/lok/teaching/ves07/papers/sutherland-headmount.pdf>.
- [146] Ivan E. Sutherland. „The Ultimate Display“. Proceedings of IFIP Congress, 1965. URL: <http://worrydream.com/refs/Sutherland%20-%20The%20Ultimate%20Display.pdf>.
- [147] F. Jacobi u. a. „Psychische Störungen in der Allgemeinbevölkerung : Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland und ihr Zusatzmodul Psychische Gesundheit (DEGS1-MH)“. In: *Der Nervenarzt* 85.1 (2014), S. 77–87. DOI: 10.1007/s00115-013-3961-y.
- [148] Frank Jacobi u. a. „Twelve-months prevalence of mental disorders in the German Health Interview and Examination Survey for Adults - Mental Health Module (DEGS1-MH): a methodological addendum and correction“. In: *International journal of methods in psychiatric research* 24.4 (2015), S. 305–313. DOI: 10.1002/mpr.1479.
- [149] David Jagneaux. „Contact CI’s Maestro VR Haptic Glove Let Me Actually Feel Virtual Objects“. In: *UploadVR* (2018). URL: <https://uploadvr.com/ces-2018-contact-ci-maestro-haptic-glove-vr/> (besucht am 14.09.2022).
- [150] Rebekka Jakob u. a. „The Design of an Avatar in a Multiplayer Serious Game“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 8.2 (2022), S. 153–156. DOI: 10.1515/cdbme-2022-1040.
- [151] Paul James. *Manus Announces VR Gloves Developer Kit Priced \$250, Shipping in Q3 – Road to VR*. 2016. URL: <https://www.roadtovr.com/manus-announces-vr-gloves-developer-kit-priced-250-shipping-in-q2/> (besucht am 20.06.2022).
- [152] Dominik Janecky, Erik Kučera und Oto Haffner. „HoloLens 2 and Virtual Reality as Methods for Managing Phobias“. In: *2022 Cybernetics & Informatics (K&I)*. IEEE, 2022, S. 1–7. ISBN: 978-1-6654-8775-7. DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925954.
- [153] Razieh Javaherirenani u. a. „Virtual reality exposure and response prevention in the treatment of obsessive-compulsive disorder in patients with contamination subtype in comparison with in vivo exposure therapy: a randomized clinical controlled trial“. In: *BMC psychiatry* 22.1 (2022), S. 740. DOI: 10.1186/s12888-022-04402-3.

- [154] Syed Fahad Javaid u. a. „Epidemiology of anxiety disorders: global burden and sociodemographic associations“. In: *Middle East Current Psychiatry* 30.1 (2023), S. 1–11. ISSN: 2090-5416. DOI: 10.1186/s43045-023-00315-3. URL: <https://mecp.springeropen.com/articles/10.1186/s43045-023-00315-3>.
- [155] John K Haas. „A History of the Unity Game Engine“. In: (2014). URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-History-of-the-Unity-Game-Engine-Haas/5e6b2255d5b7565d11e71e980b1ca141aeb3391d>.
- [156] M. Carmen Juan u. a. „Using augmented reality to treat phobias“. In: *IEEE computer graphics and applications* 25.6 (2005), S. 31–37. ISSN: 0272-1716. DOI: 10.1109/mcg.2005.143.
- [157] Takayuki Kameoka u. a. „Haptopus“. In: *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings*. Hrsg. von Patrick Baudisch. ACM Conferences. New York, NY: ACM, 2018, S. 154–156. ISBN: 9781450359498. DOI: 10.1145/3266037.3271634.
- [158] Andrea C. Katz u. a. „Changes in physiological reactivity in response to the trauma memory during prolonged exposure and virtual reality exposure therapy for posttraumatic stress disorder“. In: *Psychological trauma : theory, research, practice and policy* 12.7 (2020), S. 756–764. DOI: 10.1037/tra0000567.
- [159] Anouk Keizer u. a. „A Virtual Reality Full Body Illusion Improves Body Image Disturbance in Anorexia Nervosa“. In: *PloS one* 11.10 (2016), e0163921. DOI: 10.1371/journal.pone.0163921.
- [160] Kickstarter. *Kickstarter HoloSuit: XR Full Body Motion Tracker with Haptic Feedback* von Kaaya Tech. 2023. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/holosuit/holosuit-full-body-motion-tracker-with-haptic-feed> (besucht am 24.03.2023).
- [161] Kickstarter. *Kickstarter KOR-FX Gaming Vest: 4DFX Haptic Feedback System* von KOR-FX (Immerz, Inc). 2021. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/kor-fx/kor-fx-gaming-vest-4dfx-haptic-feedback-system?ref=discovery&term=haptic> (besucht am 29.12.2021).
- [162] Kickstarter. *Kickstarter Shockwave* von Shockwave VR. 2021. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/1110033869/shockwave?ref=discovery&term=haptic> (besucht am 29.12.2021).

- [163] Kwanguk Kim u. a. „Virtual reality for obsessive-compulsive disorder: past and the future“. In: *Psychiatry investigation* 6.3 (2009), S. 115–121. DOI: 10.4306/pi.2009.6.3.115.
- [164] Seung-Won Kim u. a. „Thermal display glove for interacting with virtual reality“. In: *Scientific reports* 10.1 (2020), S. 11403. DOI: 10.1038/s41598-020-68362-y.
- [165] Elise Klein u. a. „White matter neuro-plasticity in mental arithmetic: Changes in hippocampal connectivity following arithmetic drill training“. In: *Cortex* 114 (2019), S. 115–123. ISSN: 0010-9452. DOI: 10.1016/j.cortex.2018.05.017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010945218301734>.
- [166] Oswald D. Kothgassner u. a. „Virtual reality exposure therapy for posttraumatic stress disorder (PTSD): a meta-analysis“. In: *European journal of psychotraumatology* 10.1 (2019), S. 1654782. ISSN: 2000-8066. DOI: 10.1080/20008198.2019.1654782.
- [167] Erik Kučera u. a. „Learning Tool for Phobia Handling Based on Virtual Reality“. In: *Learning with Technologies and Technologies in Learning*. Springer, Cham, 2022, S. 155–185. DOI: 10.1007/978-3-031-04286-7_8. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-04286-7_8.
- [168] Eric Kuhn und Jason E. Owen. „Advances in PTSD Treatment Delivery: the Role of Digital Technology in PTSD Treatment“. In: *Current Treatment Options in Psychiatry* 7.2 (2020), S. 88–102. DOI: 10.1007/s40501-020-00207-x.
- [169] Ben Lang. *Watch: This Pulsating 'Haptic Skin' is Somewhat Creepy, Mostly Awesome*. 2017. URL: <https://www.roadtovr.com/omnipulse-haptic-skin-organic-robotics-lab-virtual-reality/> (besucht am 14.01.2022).
- [170] Simon Langener u. a. „Clinical Relevance of Immersive Virtual Reality in the Assessment and Treatment of Addictive Disorders: A Systematic Review and Future Perspective“. In: *Journal of clinical medicine* 10.16 (2021). ISSN: 2077-0383. DOI: 10.3390/jcm10163658.
- [171] Laure-Anne Pessina. „Artificial skin could help rehabilitation and enhance virtual reality“. In: (2019). URL: <https://actu.epfl.ch/news/artificial-skin-could-help-rehabilitation-and-enha/>.
- [172] Magic Leap. *Magic Leap 1*. 2022. URL: <https://www.magicleap.com/en-us/magic-leap-1> (besucht am 09.03.2022).

- [173] Zhenxing Li u. a. „Evaluation of haptic virtual reality user interfaces for medical marking on 3D models“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 147 (2021), S. 102561. ISSN: 10715819. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2020.102561.
- [174] Nancy H. Liu u. a. „Excess mortality in persons with severe mental disorders: a multilevel intervention framework and priorities for clinical practice, policy and research agendas“. In: *World psychiatry : official journal of the World Psychiatric Association (WPA)* 16.1 (2017), S. 30–40. ISSN: 1723-8617. DOI: 10.1002/wps.20384.
- [175] Laura LoPresti. *How real is all about the feel*. 2019. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/blog/introducing-torc-a-rigid-haptic-controller-that-renders-elastic-objects/> (besucht am 13.09.2022).
- [176] Laura Loucks u. a. „You can do that?!: Feasibility of virtual reality exposure therapy in the treatment of PTSD due to military sexual trauma“. In: *Journal of Anxiety Disorders* 61 (2019), S. 55–63. ISSN: 08876185. DOI: 10.1016/j.janxdis.2018.06.004.
- [177] Noitom Ltd. *We are a team of engineers and visionaries committed to making motion capture a universal technology*. 2023. URL: <https://www.noitom.com/> (besucht am 13.07.2023).
- [178] Yaw VR Ltd. „Yaw1 - YAW VR“. In: *YAW VR* (2021). URL: <https://shop.yawvr.com/yaw1/> (besucht am 06.01.2022).
- [179] Jasmine Lu u. a. „Chemical Haptics: Rendering Haptic Sensations via Topical Stimulants“. In: *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Hrsg. von Jeffrey Nichols, Ranjitha Kumar und Michael Nebeling. New York, NY, USA: ACM, 2021, S. 239–257. ISBN: 9781450386357. DOI: 10.1145/3472749.3474747.
- [180] Lucas LucidVR. *LucidGloves: VR Haptic Gloves on a budget*. 2022. URL: <https://hackaday.io/project/178243-lucidgloves-vr-haptic-gloves-on-a-budget> (besucht am 06.01.2022).
- [181] Lichen Ma u. a. „Integrating virtual realities and psychotherapy: SWOT analysis on VR and MR based treatments of anxiety and stress-related disorders“. In: *Cognitive behaviour therapy* 50.6 (2021), S. 509–526. DOI: 10.1080/16506073.2021.1939410.

- [182] Alla Machulska u. a. „Approach bias retraining through virtual reality in smokers willing to quit smoking: A randomized-controlled study“. In: *Behaviour Research and Therapy* 141 (2021), S. 103858. ISSN: 0005-7967. DOI: 10.1016/j.brat.2021.103858. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33862407/>.
- [183] Alla Machulska u. a. „Der Einsatz von Virtueller Realität in der Psychotherapeutischen Praxis: Aktueller Forschungsstand, Chancen, Risiken und Herausforderungen“. In: *Psychotherapie Forum* 25.3-4 (2021), S. 169–176. ISSN: 0943-1950. DOI: 10.1007/s00729-021-00185-2.
- [184] Ishan Maheshwari und Piyush Maheshwari. „Effectiveness of Immersive VR in STEM Education“. In: *Emerging technologies in virtual reality & applications*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020, S. 7–12. ISBN: 978-1-7281-8379-4. DOI: 10.1109/ITT51279.2020.9320779.
- [185] Khadija Mahmoud u. a. „Does Immersive VR Increase Learning Gain When Compared to a Non-immersive VR Learning Experience?“ In: *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems*. Hrsg. von Panayiotis Zaphiris und Andri Ioannou. Bd. 12206. Springer eBook Collection. Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2020, S. 480–498. ISBN: 978-3-030-50505-9. DOI: 10.1007/978-3-030-50506-6_33.
- [186] Maike Looß. „Lerntypen? Ein pädagogisches Konstrukt auf dem Prüfstand“. In: (2001). URL: https://www.lernumgebungen.ch/files/artikel_buecher/maike_loos_lerntypen_2001.pdf (besucht am 13.11.2019).
- [187] Tom Man. *ViR | tommandesign*. 2023. URL: <https://www.tommandesign.com/copy-of-seaguard-1> (besucht am 04.08.2023).
- [188] Stephanie M. Manasse u. a. „Using virtual reality to train inhibitory control and reduce binge eating: A proof-of-concept study“. In: *Appetite* 157 (2021), S. 104988. ISSN: 0195-6663. DOI: 10.1016/j.appet.2020.104988. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019566632031610X>.
- [189] Margaret Rouse. „Integrierte Entwicklungsumgebung (IDE)“. In: (2018). URL: <https://whatis.techtarget.com/de/definition/Integrierte-Entwicklungsumgebung-IDE> (besucht am 13.11.2019).
- [190] Maria Matsangidou u. a. „“Now i can see me” designing a multi-user virtual reality remote psychotherapy for body weight and shape concerns“. In: *Human-Computer*

- Interaction* 37.4 (2022), S. 314–340. ISSN: 0737-0024. DOI: 10.1080/07370024.2020.1788945.
- [191] Daichi Matsumoto u. a. „An Immersive Visuo-Haptic VR Environment with Pseudo-haptic Effects on Perceived Stiffness“. In: *Haptic Interaction*. Hrsg. von Shoichi Hasegawa u. a. Bd. 432. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2018, S. 281–285. ISBN: 978-981-10-4156-3. DOI: 10.1007/978-981-10-4157-0_48.
- [192] Elizabeth McMahon und Debra Boeldt. „VR Exposure Therapy“. In: *Virtual Reality Therapy for Anxiety*. Hrsg. von Elizabeth McMahon und Debra Boeldt. New York: Routledge, 2021, S. 37–54. ISBN: 9781003154068. DOI: 10.4324/9781003154068-4.
- [193] MedicineNet. *What Are the Top 10 Mental Health Issues and Illnesses?* 2022. URL: https://www.medicinenet.com/top_10_mental_health_issues_and_illnesses/article.htm (besucht am 03.08.2022).
- [194] Kyle Melnick. *Plexus Unveils VR/AR Gloves Compatible With Major VR Controllers - VRScout*. 2018. URL: <https://vrscout.com/news/plexus-unveils-vr-ar-gloves/> (besucht am 14.09.2022).
- [195] Nicole Menche. *Biologie Anatomie Physiologie*. 8. Aufl. München: Urban & Fischer in Elsevier, 2016. Kap. 8. ISBN: 3437268031.
- [196] Meta. *Meta Quest: VR-Headsets, Zubehör und Accessoires* | *Meta Quest*. 2023. URL: https://www.meta.com/de/quest/?gclid=Cj0KCQjw3a2iBhCFARIsAD4jQB0vMKWY7ygKdDNWUVnKrc0cqUXA2Sr3seEAqnQb4e4aSyyJHEN_9zQaAmy_EALw_wcB&gclidsrc=aw.ds (besucht am 28.04.2023).
- [197] MANUS Meta. *MANUS | Xsens Gloves*. 2022. URL: <https://www.manus-meta.com/xsens-gloves> (besucht am 05.01.2022).
- [198] MANUS Meta. *MANUS Meta*. 2023. URL: <https://resources.manus-meta.com/downloads> (besucht am 06.08.2023).
- [199] MANUS Meta. *Prime 3 Haptic XR*. 2023. URL: <https://www.manus-meta.com/products/prime-3-haptic-xr> (besucht am 03.08.2023).
- [200] Microsoft. *HoloLens 2 – Preise und Optionen | Microsoft HoloLens*. 2022. URL: <https://www.microsoft.com/de-de/hololens/buy> (besucht am 09.03.2022).

- [201] Franziska Miegel u. a. „Exposure and Response Prevention in Virtual Reality for Patients with Contamination-Related Obsessive-Compulsive Disorder: a Case Series“. In: *Psychiatric Quarterly* 93.3 (2022), S. 861–882. ISSN: 1573-6709. DOI: 10.1007/s11126-022-09992-5. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11126-022-09992-5#%20citeas>.
- [202] Matthias Mielke. *ISBN 978-3-8439-3440-4*. 2023. URL: <https://www.dr.hut-verlag.de/978-3-8439-3440-4.html> (besucht am 18.08.2023).
- [203] Alexander Miloff u. a. „Automated virtual reality exposure therapy for spider phobia vs. in-vivo one-session treatment: A randomized non-inferiority trial“. In: *Behaviour Research and Therapy* 118 (2019), S. 130–140. ISSN: 0005-7967. DOI: 10.1016/j.brat.2019.04.004.
- [204] Mohammadreza Mirzaei, Peter Kán und Hannes Kaufmann. „Effects of Using Vibrotactile Feedback on Sound Localization by Deaf and Hard-of-Hearing People in Virtual Environments“. In: *Electronics* 10.22 (2021), S. 2794. DOI: 10.3390/electronics10222794.
- [205] Andrew Mitrak. *HaptX launches HaptX Gloves DK2 to bring true-contact haptics to VR and robotics | HaptX*. 2021. URL: <https://haptx.com/dk2-release/> (besucht am 24.03.2023).
- [206] MIXED. „Haptik-VR: Die coolsten Produkte für Gefühl in VR“. In: *MIXED* (2020). URL: <https://mixed.de/haptik-vr-liste/#VRgluv> (besucht am 05.01.2022).
- [207] mobfish VR STUDIO - Build your own interactive VR App! *Immersion VR - Alles was du darüber wissen musst!* 2019. URL: <https://mobfish.net/de/blog/immersion-vr/#genaue-definition-von-immersion-in-der-virtual-reality> (besucht am 11.08.2023).
- [208] Moritz M R Faust u. a. *Development of a virtual reality simulation for exposure based addiction therapy*. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.29544.39686.
- [209] India Morrison. „Keep Calm and Cuddle on: Social Touch as a Stress Buffer“. In: *Adaptive Human Behavior and Physiology* 2.4 (2016), S. 344–362. DOI: 10.1007/s40750-016-0052-x.

- [210] Victoria A. Mountford, Kate Tchanturia und Lucia Valmaggia. „What Are You Thinking When You Look at Me? A Pilot Study of the Use of Virtual Reality in Body Image“. In: *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 19.2 (2016), S. 93–99. ISSN: 2152-2723. DOI: 10.1089/cyber.2015.0169.
- [211] A. Mühlberger, M. Sperber und M. J. Wieser. „A Virtual Reality Behavior Avoidance Test (VR-BAT) for the Assessment of Spider Phobia“. In: *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation* 1(2) (2008), S. 147–157. URL: https://www.researchgate.net/publication/279542496_A_Virtual_Reality_Behavior_Avoidance_Test_VR-BAT_for_the_Assessment_of_Spider_Phobia (besucht am 24.03.2023).
- [212] Multisense. *Wer Menschen berühren will, muss sie berühren*. 2022. URL: <https://www.multisense.de/wissen/praxisstimmen/haptik/item/wer-menschen-beruehren-will-muss-sie-beruehren> (besucht am 08.02.2022).
- [213] Katherine Nameth u. a. „Translating Virtual Reality Cue Exposure Therapy for Binge Eating into a Real-World Setting: An Uncontrolled Pilot Study“. In: *Journal of clinical medicine* 10.7 (2021). ISSN: 2077-0383. DOI: 10.3390/jcm10071511.
- [214] NeoGamer. *1997/1998 - The Release of the Playstation Dual Analog and DualShock Controllers*. 2022. URL: https://www.youtube.com/watch?v=pvdphj-iDkE&ab_channel=NeoGamer-TheVideoGameArchive (besucht am 13.04.2022).
- [215] Neosensory. *Neosensory*. 2022. URL: <https://neosensory.com/product/exoskin/> (besucht am 05.01.2022).
- [216] Monks - Ärzte im Netz. *Bipolare Erkrankungen* ». 2022. URL: <https://www.neurologen-und-psihiater-im-netz.org/psychiatrie-psychosomatik-psychotherapie/stoerungen-erkrankungen/bipolare-erkrankungen> (besucht am 03.08.2022).
- [217] NHS.uk. *Overview - Psychosis*. 2019. URL: <https://www.nhs.uk/mental-health/conditions/psychosis/overview/> (besucht am 01.08.2022).
- [218] Nicola Sobieraj u. a. *A step towards VR therapy for Alzheimer’s disease*. 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.12417.10082.
- [219] Nintendo of Europe GmbH. *Rumble Pak | Nintendo 64 | Hilfe | Nintendo*. 2022. URL: <https://www.nintendo.de/Hilfe/Nintendo-64/Zubehor/Rumble-Pak/Rumble-Pak-246444.html#> (besucht am 13.04.2022).

- [220] Jannat Un Nisa. „These New VR/AR Gloves Allow You To Safely Touch Dangerous Objects“. In: *Wonderful Engineering* (2023). URL: <https://wonderfulengineering.com/these-new-vr-ar-gloves-allow-you-to-safely-touch-dangerous-objects/> (besucht am 20.03.2023).
- [221] Noitom. *Home | Hi5 VR Glove*. 2022. URL: <https://hi5vrglove.com/> (besucht am 06.01.2022).
- [222] Notion. *Notion – The all-in-one workspace for your notes, tasks, wikis, and databases*. 2023. URL: <https://bhaptics.notion.site/Plug-in-deployed-events-to-Unity-33cc33dcfa44426899a3f21c62adf66d> (besucht am 05.01.2023).
- [223] *Oculus App Development in Unity | Oculus Developers*. 2022. URL: <https://developer.oculus.com/documentation/unity/> (besucht am 03.03.2022).
- [224] Issei Ohashi u. a. „Comparison of Electromyogram During Ball Catching Task in Haptic VR and Real Environment“. In: *Human Interface and the Management of Information. Interaction, Visualization, and Analytics*. Hrsg. von Sakae Yamamoto und Hirohiko Mori. Bd. 10904. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 415–425. ISBN: 978-3-319-92042-9. DOI: 10.1007/978-3-319-92043-6_35.
- [225] Or3d. *Geomagic Touch - Professional haptic device providing force feedback*. 2022. URL: <https://www.or3d.co.uk/products/hardware/haptic-devices/geomagic-touch/> (besucht am 24.03.2023).
- [226] Or3d. *Geomagic Touch X - Haptic device providing high fidelity force feedback*. 2021. URL: <https://www.or3d.co.uk/products/hardware/haptic-devices/geomagic-touch-x/> (besucht am 17.01.2022).
- [227] Julio Ore u. a. „Augmented reality for the treatment of arachnophobia: exposure therapy“. In: *World Journal of Engineering* 18.4 (2021), S. 566–572. ISSN: 1708-5284. DOI: 10.1108/WJE-09-2020-0410. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/WJE-09-2020-0410/full/pdf>.
- [228] World Health Organization. „Psychische Gesundheit – Faktenblatt“. In: (). URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/404853/MNH_FactSheet_DE.pdf (besucht am 20.02.2023).

- [229] Universität Osnabrück. *Was ist eine Substanzabhängigkeit? - Universität Osnabrück*. 2022. URL: https://www.psychotherapie.uni-osnabrueck.de/ambulante_psychotherapie/infotehek/problembereiche/was_ist_eine_substanzabhaengigkeit.html (besucht am 03.08.2022).
- [230] OWO. *OWO – Feel the Game*. 2021. URL: <https://owogame.com/> (besucht am 28.12.2021).
- [231] Seth Paniagua. *HoloLens-Hardware (1. Generation)*. 2022. URL: <https://docs.microsoft.com/de-de/hololens/hololens1-hardware> (besucht am 09.03.2022).
- [232] Christine Pauli. *Tastsinn – Fühlen geht über die Haut*. 2022. URL: <https://www.dasgehirn.info/wahrnehmen/fuehlen/aussenstelle-des-gehirns> (besucht am 26.01.2022).
- [233] Helmut Pauls. *Gestalttherapie im Dorsch Lexikon der Psychologie*. 2021. URL: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/gestalttherapie>.
- [234] Infinity PBR. *Spider Character Spiders Pack - Fantasy RPG / 3D Creatures / Unity Asset Store*. 2023. URL: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/creatures/spider-character-spiders-pack-fantasy-rpg-79409> (besucht am 13.07.2023).
- [235] V. I. Petrenko u. a. „Development of haptic gloves with vibration feedback as a tool for manipulation in virtual reality based on bend sensors and absolute orientation sensors“. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 873.1 (2020), S. 012025. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/873/1/012025.
- [236] Dr. Thies Pfeiffer. *Virtuelle Realität, Immersion und Präsenz*. Hrsg. von Universität Bielefeld. URL: https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~tpfeiffe/lehre/VirtualReality/%20virtuelle_realitaet_ws2011/%20Virtuelle_Realitaet_12_-_Immersion_und_Praesenz.html (besucht am 11.12.2019).
- [237] Tom Phillips. „The MMOne is a three-axis Virtual Reality chair attached to a crane“. In: *Eurogamer.net* (2015). URL: <https://www.eurogamer.net/the-mmone-is-a-three-axis-virtual-reality-chair-attached-to-a-crane> (besucht am 24.03.2023).
- [238] Bruno Porras-Garcia u. a. „The influence of gender and body dissatisfaction on body-related attentional bias: An eye-tracking and virtual reality study“. In: *The International journal of eating disorders* 52.10 (2019), S. 1181–1190. DOI: 10.1002/eat.23136.

- [239] Prof. Dr. Daniel Markgraf. „Definition: Augmented Reality“. In: *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH* (2018). URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/augmented-reality-53628> (besucht am 09.03.2022).
- [240] Prof. Dr. Oliver Bendel. *Virtuelle Realität*. Hrsg. von Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/virtuelle-realitaet-54243> (besucht am 24.09.2019).
- [241] Pasadena Villa Psychiatric. „The Ten Most Common Mental Disorders“. In: *Pasadena Villa* (2019). URL: <https://www.pasadenavilla.com/resources/blog/most-common-mental-disorders/> (besucht am 03.08.2022).
- [242] Psychotherapiesuche. *Was ist Psychotherapie? Ein Überblick über Indikation und verschiedene Therapieverfahren*. 2022. URL: <https://www.psychotherapie.de/pid/therapie> (besucht am 03.08.2022).
- [243] Clare K. Purvis u. a. „Developing a Novel Measure of Body Satisfaction Using Virtual Reality“. In: *PLoS ONE* 10.10 (2015), e0140158. ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0140158.
- [244] Qianw211. *Unity-Entwicklung für HoloLens - Mixed Reality*. 2022. (Besucht am 03.03.2022).
- [245] Redaktion. „Uni Siegen: Mit Teslasuit virtuell Spinnenphobie überwinden“. In: *Westfalenpost* (2020). URL: <https://www.wp.de/staedte/siegerland/uni-siegen-mit-teslasuit-virtuell-spinnenphobie-ueberwinden-id231111434.html> (besucht am 05.08.2023).
- [246] Rednaxela21. *Aufbau einer Nervenzelle | ZUM-Apps*. 2022. URL: <https://apps.zum.de/apps/9076> (besucht am 05.09.2022).
- [247] Greg M Reger u. a. „Randomized controlled trial of prolonged exposure using imaginal exposure vs. virtual reality exposure in active duty soldiers with deployment-related posttraumatic stress disorder (PTSD)“. In: *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 84.11 (2016), S. 946–959. ISSN: 1939-2117. DOI: 10.1037/ccp0000134.
- [248] Microsoft Research. *TORC: A virtual reality controller for in-hand high-dexterity finger interaction*. 2022. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=w1Rgo6qjwGs> (besucht am 19.07.2022).

- [249] Robert Koch Institut. „PSYCHISCHE GESUNDHEIT IN DEUTSCHLAND · Bericht Teil 1 – Erwachsene“. In: (). URL: https://www.rki.de/DE/Content/GesundAZ/P/Psychische_Gesundheit/EBH_Bericht_Psychische_Gesundheit.pdf?__blob=publicationFile (besucht am 20.02.2023).
- [250] Adi Robertson. „Meta haptic glove prototype lets you feel VR objects using air pockets“. In: *The Verge* (2021). URL: <https://www.theverge.com/2021/11/16/22782860/meta-facebook-reality-labs-soft-robotics-haptic-glove-prototype> (besucht am 06.01.2022).
- [251] Dexta Robotics. *Dexta Robotics - Touch the Untouchable*. 2021. URL: <https://www.dextarobotics.com/product> (besucht am 05.01.2022).
- [252] Dexta Robotics. *Touch the Untouchable*. 2023. URL: <https://www.dextarobotics.com/> (besucht am 13.07.2023).
- [253] RootMotion. *Final IK | Animation Tools | Unity Asset Store*. 2022. URL: <https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/final-ik-14290> (besucht am 13.06.2022).
- [254] B. O. Rothbaum u. a. „A controlled study of virtual reality exposure therapy for the fear of flying“. In: *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 68.6 (2000), S. 1020–1026. ISSN: 0022-006X. DOI: 10.1037/0022-006x.68.6.1020.
- [255] Barbara Olasov Rothbaum, Larry Hodges und Renato Alaron. „Virtual Reality Exposure Therapy for PTSD Vietnam Veterans: A Case Study“. In: *Journal of Translational Stress* 12 (1999). DOI: 10.1023/A:1024772308758.
- [256] Roto-vr. *Virtual Reality | Roto VR Chair | London*. 2022. URL: <https://www.rotovr.com/> (besucht am 06.01.2022).
- [257] Eva Rudolf-Müller. *Dermis (Lederhaut): Funktion und Aufbau - NetDoktor*. 2022. URL: <https://www.netdoktor.de/anatomie/dermis/> (besucht am 26.01.2022).
- [258] Eva Rudolf-Müller. *Epidermis: Funktion und Aufbau - NetDoktor*. 2022. URL: <https://www.netdoktor.de/anatomie/epidermis/> (besucht am 26.01.2022).
- [259] Eva Rudolf-Müller. *Haut (Cutis): Aufbau und Funktion - NetDoktor*. 2022. URL: <https://www.netdoktor.de/anatomie/haut/> (besucht am 26.01.2022).
- [260] Eva Rudolf-Müller. *Subcutis (Unterhaut): Aufbau und Funktion - NetDoktor*. 2022. URL: <https://www.netdoktor.de/anatomie/subcutis/> (besucht am 26.01.2022).

- [261] Eva Rudolf-Müller. *Taktile Wahrnehmung: die Rezeptoren der Haut - NetDoktor*. 2022. URL: <https://www.netdoktor.de/anatomie/taktile-wahrnehmung/> (besucht am 26.01.2022).
- [262] Sam, N. „What is BEHAVIORAL APPROACH TASK (BAT)? definition of BEHAVIORAL APPROACH TASK (BAT) (Psychology Dictionary)“. In: *Psychology Dictionary* (2013). URL: <https://psychologydictionary.org/behavioral-approach-task-bat/> (besucht am 19.04.2022).
- [263] Yara Bremer Sarah Benz Simone Bitzer, Hrsg. *Neuropsychologischer Ratgeber*. 2019. URL: <https://www.ratgeber-neuropsychologie.de/gedaechtnis/gedaechtnis2.html> (besucht am 24.09.2019).
- [264] Lukas Sayn. „Virtuelles Expositionstraining unter Anwendung von Beobachtungslernen zur Unterstützung bei der Behandlung von Arachnophobie“. Masterthesis, University of Siegen. 2022.
- [265] Ilse Schlingensiepen. *Psychotherapie-Richtlinie – wirkt die Reform?* 2021. URL: <https://www.aerztezeitung.de/Politik/Psychotherapie-Richtlinie-wirkt-die-Reform-411781.html> (besucht am 23.12.2020).
- [266] Ricardo Schmidt. „Entwicklung einer Anwendung in virtueller Realität zur Expositionstherapie von Arachnophobie mit therapeutischem Fokus auf soziale Unterstützung des Patienten“. Masterthesis, University of Siegen. 2022.
- [267] Vanessa Schmücker. „Konzeption und Implementierung eines Gedächtnistrainings in der virtuellen Realität unter Verwendung individueller Memoiren“. Masterthesis, University of Siegen. 2020.
- [268] Vanessa Schmücker u. a. „Abstracts of the 2022 Joint Annual Conference of the Austrian (ÖGBMT), German (VDE DGBMT) and Swiss (SSBE) Societies for Biomedical Engineering, including the 14th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation“. In: Bd. 67. s1. 2022. DOI: 10.1515/bmt-2022-2001.
- [269] Vanessa Schmücker u. a. „Behavioral Avoidance Test: Comparison between in vivo and virtual reality using questionnaires and psychophysiology“. In: *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. IEEE, 2022, S. 180–185. ISBN: 978-1-6654-5725-5. DOI: 10.1109/AIVR56993.2022.00036.

- [270] Vanessa Schmücker u. a. „Conception And Implementation of an Virtual Reality application for the evaluation of different types of commercially available haptic gloves“. In: *57th DGBMT Annual Conference on Biomedical Engineering!* (2023). Accepted. DOI: 10.1515/.
- [271] Vanessa Schmücker u. a. „Customizable Memory Training in Virtual Reality with Personal Memoirs“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. IEEE, 2021, S. 189–193. ISBN: 978-1-6654-3225-2. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00042.
- [272] Vanessa Schmücker u. a. „Extension of an Existing VR Memory Training with Haptic Impressions due to a Haptic Vest“. In: *57th DGBMT Annual Conference on Biomedical Engineering!* (2023). Accepted. DOI: 10.1515/.
- [273] Ulrich Schnyder. *Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS)* ». 2022. URL: <https://www.neurologen-und-psihiater-im-netz.org/psychiatrie-psychosomatik-psychotherapie/stoerungen-erkrankungen/posttraumatische-belastungsstoerung-ptbs> (besucht am 03.08.2022).
- [274] Schöttner, Dr. Michael. „Virtuelle Präsenz“. Vorlesung. Universität Ulm, 2004. URL: http://www-vs.informatik.uni-ulm.de/teach/ws04/vp/VPS_WS0405_01_Einleitung.pdf.
- [275] M. J. Schuemie u. a. „Research on presence in virtual reality: a survey“. In: *Cyberpsychology & behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society* 4.2 (2001), S. 183–201. ISSN: 1094-9313. DOI: 10.1089/109493101300117884.
- [276] Jochen Schweitzer-Rothers. *Systemische Psychotherapie im Dorsch Lexikon der Psychologie*. 2021. URL: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/systemische-psychotherapie>.
- [277] SenseGlove. *AR & VR Software | SenseGlove | SenseGlove*. 2023. URL: <https://www.senseglove.com/developer/> (besucht am 06.08.2023).
- [278] SenseGlove. *Development hours | SenseGlove*. 2022. URL: <https://www.senseglove.com/product/development-hours/> (besucht am 06.01.2022).
- [279] SenseGlove. *Nova | SenseGlove*. 2022. URL: <https://www.senseglove.com/product/nova/> (besucht am 06.01.2022).

- [280] Vivian Shen, Craig Shultz und Chris Harrison. „Mouth Haptics in VR using a Headset Ultrasound Phased Array“. In: *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Hrsg. von Simone Barbosa. ACM Digital Library. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2022, S. 1–14. ISBN: 9781450391573. DOI: 10.1145/3491102.3501960.
- [281] Vivian Shen, Craig Shultz und Chris Harrison. *Mouth Haptics in VR using a Headset Ultrasound Phased Array*. 2023. URL: <https://www.figlab.com/research/2022/mouth-haptics> (besucht am 13.07.2023).
- [282] Jotaro Shigeyama u. a. „Demonstration of Transcalibur“. In: *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Hrsg. von Stephen Brewster u. a. New York, NY, USA: ACM, 2019, S. 1–4. ISBN: 9781450359719. DOI: 10.1145/3290607.3313243.
- [283] Jotaro Shigeyama u. a. „Transcalibur“. In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Hrsg. von Stephen Brewster u. a. New York, NY, USA: ACM, 2019, S. 1–11. ISBN: 9781450359702. DOI: 10.1145/3290605.3300241.
- [284] Shockwave. *Pre Order / Shockwave*. 2023. URL: <https://www.shockwavesuit.com/pre-order> (besucht am 04.08.2023).
- [285] Mike Sinclair u. a. „CapstanCrunch“. In: *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Hrsg. von François Guimbretière, Michael Bernstein und Katharina Reinecke. New York, NY, USA: ACM, 2019, S. 815–829. ISBN: 9781450368162. DOI: 10.1145/3332165.3347891.
- [286] Skarredghost. „Ekto VR hands-on: the craziest boots to walk in VR“. In: *Skarredghost* (2021). URL: <https://skarredghost.com/2021/11/25/ekto-vr-hands-on-review/> (besucht am 19.07.2022).
- [287] Frédérique R. E. Smink, Daphne van Hoeken und Hans W. Hoek. „Epidemiology of eating disorders: incidence, prevalence and mortality rates“. In: *Current psychiatry reports* 14.4 (2012), S. 406–414. ISSN: 1535-1645. DOI: 10.1007/s11920-012-0282-y. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22644309/>.
- [288] S Smys, Raj Jennifer und Krishna Raj. „September 2019“. In: *Journal of Electronics and Informatics* 01.01 (2019), S. 24–34. DOI: 10.36548/jei.2019.1.003.

- [289] Solvelight Robotics. *Dextarobotics Dexmo Haptic Feedback Exoskeleton Gloves - Solvelight Robotics*. 2022. URL: <https://solvelight.com/product/dextarobotics-dexmo-haptic-feedback-exoskeleton-gloves/> (besucht am 14.09.2022).
- [290] *Somatosensorik*. 2022. URL: <http://physiologie.cc/XIV.3.htm> (besucht am 05.09.2022).
- [291] Harshal A. Sonar u. a. „Closed-Loop Haptic Feedback Control Using a Self-Sensing Soft Pneumatic Actuator Skin“. In: *Soft robotics* 7.1 (2020), S. 22–29. DOI: 10.1089/soro.2019.0013.
- [292] Gaurav Sood. „This FPS gaming VR controller has realistic force feedback to feel actual gun recoil“. In: *Yanko Design* (2022). URL: <https://www.yankodesign.com/2022/07/05/this-fps-gaming-vr-controller-has-realistic-force-feedback-to-feel-actual-gun-recoil/> (besucht am 24.03.2023).
- [293] Gaurav Sood. „This FPS gaming VR controller has realistic force feedback to feel actual gun recoil“. In: *Yanko Design* (2022). URL: <https://www.yankodesign.com/2022/07/05/this-fps-gaming-vr-controller-has-realistic-force-feedback-to-feel-actual-gun-recoil/amp/> (besucht am 14.07.2022).
- [294] Christoph Spinger. „High Fidelity And NeoSensory stellen neue Feedback-Jacke Exoskin vor“. In: *VR-Nerds* (2018). URL: <https://www.vrnerds.de/high-fidelity-and-neosensory-stellen-neue-feedback-jacke-exoskin-vor/> (besucht am 24.03.2023).
- [295] Christoph Spinger. „Ultrahaptics veröffentlicht STRATOS Explore Development Kit“. In: *VR-Nerds* (2018). URL: <https://www.vrnerds.de/ultrahaptics-veroeffentlicht-stratos-explore-development-kit/> (besucht am 04.08.2023).
- [296] Manfred Spitzer. „Das haptische Gedächtnis“. In: *Nervenheilkunde* 38.01 (2019), S. 49–52. ISSN: 0722-1541. DOI: 10.1055/a-0824-2347.
- [297] Spotify. *Spotify - Web Player: Music for everyone*. 2023. URL: <https://open.spotify.com/> (besucht am 23.03.2023).
- [298] Spotify. *Spotify Webplayer*. 2023. URL: <https://open.spotify.com/intl-de> (besucht am 10.06.2023).

- [299] Sam Sprigg. *South Korean startup Wave Company announces electro-haptic suit that combines EMS with VR for gaming and exercise* | Auganix.org. 2021. URL: <https://www.auganix.org/south-korean-startup-wave-company-announces-electro-haptic-suit-that-combines-ems-with-vr-for-gaming-and-exercise/> (besucht am 29.12.2021).
- [300] SRH. *Motorischer Lerntyp Die richtige Lernstrategie für Ihr Lernverhalten*. URL: <https://www.mobile-university.de/ihr-studium/lerntipps/motorischer-lerntyp/>.
- [301] SSA. *What is... Cue-Exposure Therapy? - SSA*. 2019. URL: <https://www.addiction-ssa.org/knowledge-hub/what-is-cue-exposure-therapy/> (besucht am 10.03.2023).
- [302] Werner Stangl. *Aristotelische Täuschung*. Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/23929/aristotelische-taeuschung> (besucht am 01.03.2022).
- [303] Werner Stangl. *Charpentiersche Täuschung*. Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/23927/charpentiersche-taeuschung> (besucht am 01.03.2022).
- [304] Werner Stangl. *Gesprächstherapie – Gesprächspsychotherapie* . Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/2744/gespraechspsychotherapie-gesprachstherapie> (besucht am 03.08.2022).
- [305] Werner Stangl. *Gestalttherapie* . Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/5547/gestalttherapie> (besucht am 03.08.2022).
- [306] Werner Stangl. *Habituation* – Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/35/habituation> (besucht am 08.02.2022).
- [307] Werner Stangl. *Haptik* – Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/16251/haptik> (besucht am 08.02.2022).
- [308] Werner Stangl. *systemische Therapie* . Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/3294/systemische-therapie> (besucht am 03.08.2022).
- [309] Werner Stangl. *tiefenpsychologische Psychotherapie* . Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/8781/tiefenpsychologische-psychotherapie> (besucht am 03.08.2022).

- [310] Werner Stangl. *Verhaltenstherapie*. *Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik*. 2022. URL: <https://lexikon.stangl.eu/213/verhaltenstherapie> (besucht am 03.08.2022).
- [311] Statistisches Bundesamt. *Psychische Erkrankungen wurden 2020 bei 18% der Krankenhausbehandlungen von 15- bis 24-Jährigen diagnostiziert*. 2022. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2022/PD22_32_p002.html (besucht am 20.02.2023).
- [312] *SteamVR Unity Plugin / SteamVR Unity Plugin*. 2019. URL: https://valvesoftware.github.io/steamvr_unity_plugin/ (besucht am 03.03.2022).
- [313] Annika Steiger u. a. „Augmented Reality Application for Simulation of Mamma Palpation“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 8.2 (2022), S. 416–418. DOI: 10.1515/cdbme-2022-1106.
- [314] Carolin Stellmacher. „Haptic-Enabled Buttons Through Adaptive Trigger Resistance“. In: *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. IEEE, 2021, S. 201–204. ISBN: 978-1-6654-4057-8. DOI: 10.1109/VRW52623.2021.00044.
- [315] Carolin Stellmacher u. a. „Triggermuscle: Exploring Weight Perception for Virtual Reality Through Adaptive Trigger Resistance in a Haptic VR Controller“. In: *Frontiers in Virtual Reality 2* (2022). DOI: 10.3389/frvir.2021.754511.
- [316] Andreas Stötter u. a. „Achtsame Massage und Achtsamkeitsschulung (Insightouch®) bei Depressionen, psychosomatischen und Bindungsstörungen“. In: *Complementary medicine research* 26.1 (2019), S. 4–12. DOI: 10.1159/000492060.
- [317] Ler digital studio. *Beat Saber - VR rhythm game*. 2023. URL: <https://beatsaber.com/> (besucht am 14.08.2023).
- [318] SUBPAC. *M2X (Wearable)*. 2021. URL: <https://eu.subpac.com/products/m2x> (besucht am 29.12.2021).
- [319] T Schubert, F Friedmann, H Regenbrecht. „The Experience of Presence: Factor Analytic Insights“. In: (2001). URL: http://www.hci.otago.ac.nz/pubs/2001_SchubertFriedmannRegenbrecht_PRESENCEJune2001_p266.pdf (besucht am 11.12.2019).
- [320] T.Hoffmann. *Rauchentwöhnung mit Virtual Reality*. 2023. URL: <https://www.uni-siegen.de/start/news/oeffentlichkeit/839663.html> (besucht am 03.08.2023).

- [321] Tebepah Tariuge. „Speech-Based Virtual Assistant for Treatment of Alzheimer Disease Patient Using Virtual Reality Environment (VRE)“. In: *Design, Operation and Evaluation of Mobile Communications*. Hrsg. von Gavriel Salvendy und June Wei. Bd. 13337. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 378–387. ISBN: 978-3-031-05013-8. DOI: 10.1007/978-3-031-05014-5_31.
- [322] Whiplash Team. *Whiplash – The ultimate Extrem Experience 360° VR motion*. 2022. URL: <https://whiplash.es/> (besucht am 06.01.2022).
- [323] Unity Technologies. *Unity*. 2022. URL: <https://unity.com/de> (besucht am 03.03.2022).
- [324] Unity Technologies. *Unity - Manual: Getting started with VR development in Unity*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/VROverview.html> (besucht am 03.03.2022).
- [325] Unity Technologies. *Unity - Manual: Hierachry*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/Hierarchy.html> (besucht am 03.03.2022).
- [326] Unity Technologies. *Unity - Manual: Prefabs*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/Prefabs.html> (besucht am 03.03.2022).
- [327] Unity Technologies. *Unity - Manual: Scripting*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/ScriptingSection.html> (besucht am 07.03.2022).
- [328] Unity Technologies. *Unity - Manual: The Game view*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/GameView.html> (besucht am 03.03.2022).
- [329] Unity Technologies. *Unity - Manual: The Inspector window*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/UsingTheInspector.html> (besucht am 03.03.2022).
- [330] Unity Technologies. *Unity - Manual: The Scene view*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/UsingTheSceneView.html> (besucht am 03.03.2022).
- [331] Unity Technologies. *Unity - Scripting API: Rigidbody*. 2022. URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Rigidbody.html> (besucht am 07.03.2022).
- [332] TESLASUIT. *Full body haptic feedback & motion capture tracking VR suit - TESLASUIT*. 2021. URL: <https://teslasuit.io/> (besucht am 29.12.2021).
- [333] TESLASUIT. *How do TESLASUIT technologies change enterprise training? - TESLASUIT*. 2018. URL: <https://teslasuit.io/blog/how-teslasuit-changes-enterprise-training/> (besucht am 29.12.2021).

- [334] TheProGamerJay. *How much pain can i feel in VR? (Haptic Suit)*. 2021. URL: https://www.youtube.com/watch?v=TojeeAoqdSU&ab_channel=TheProGamerJay (besucht am 29.12.2021).
- [335] Team Thesius. *Die vier Lerntypen – der auditive Lerntypn*. URL: <https://thesius.de/blog/articles/auditiver-lerntyp/>.
- [336] Thobaben, Amelie and Kordy, Henrike. *Prolongierte Exposition (PE)*. 2023. URL: <https://www.praxis-thobaben.net/psychotherapie/psychotraumatherapie/pe/> (besucht am 14.03.2023).
- [337] Jenny Tobien. „Pokemon Go: Millionen Spieler – Woher kommt der gigantische Hype?“ In: *WELT* (2016). URL: <https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article157051983/Woher-kommt-der-gigantische-Pokemon-Go-Hype.html> (besucht am 09.03.2022).
- [338] Andre Torrao u. a. „A VR Game for Obsessive-Compulsive Disorders Therapy“. In: *2021 International Conference on Graphics and Interaction (ICGI)*. IEEE, 2021, S. 1–8. ISBN: 978-1-6654-8343-8. DOI: 10.1109/ICGI54032.2021.9655282.
- [339] N. Tsamitros u. a. „Virtual Reality-Based Treatment Approaches in the Field of Substance Use Disorders“. In: *Current Addiction Reports* 8.3 (2021), S. 399–407. DOI: 10.1007/s40429-021-00377-5.
- [340] TurboSquid. *3D Models for Professionals :: TurboSquid*. 2022. URL: <https://www.turbosquid.com/> (besucht am 20.04.2022).
- [341] *Über die VIVE Controller*. 2022. URL: https://www.vive.com/de/support/vive/category_howto/about-the-controllers.html (besucht am 13.04.2022).
- [342] *Über die VIVE Controller*. 2023. URL: https://www.vive.com/de/support/vive-pro-hmd/category_howto/about-the-controllers.html (besucht am 24.04.2023).
- [343] Ultraleap. *Feel the future taking shape*. 2023. URL: <https://www.ultraleap.com/company/> (besucht am 13.07.2023).
- [344] Ultraleap. *Haptics | STRATOS Explore | Ultraleap*. 2021. URL: <https://www.ultraleap.com/product/stratos-explore/> (besucht am 06.01.2022).
- [345] Ultraleap. *Haptics | Ultraleap*. 2023. URL: <https://www.ultraleap.com/company/news/press-release/stratos-inspire/> (besucht am 04.08.2023).

- [346] Ultraleap. *Leap Motion Controller*. URL: <https://www.leapmotion.com/product/leap-motion-controller/> (besucht am 04.01.2020).
- [347] Unbound XR. (*EOL*) *Woojer Vest Edge*. 2023. URL: <https://unboundxr.de/woojer-vest-edge> (besucht am 24.03.2023).
- [348] Unbound XR. (*Tweedekans*) *bHaptics TactSuit X40*. 2023. URL: <https://unboundxr.de/tweedekans-bhaptics-tactsuit-x40> (besucht am 24.03.2023).
- [349] Unbound XR. *bHaptics TactGlove DK1 (XL)*. 2023. URL: <https://unboundxr.de/bhaptics-tactglove-xl> (besucht am 24.03.2023).
- [350] Unbound XR. *Manus Prime X Haptic VR*. 2023. URL: <https://unboundxr.de/manus-prime-x-haptic-vr> (besucht am 24.03.2023).
- [351] Unbound XR. *SenseGlove Nova*. 2023. URL: <https://unboundxr.de/senseglove-nova> (besucht am 24.03.2023).
- [352] Unity. *Bring your vision to life*. URL: <https://unity.com/>.
- [353] *Unity Asset Store - The Best Assets for Game Making*. 2023. URL: <https://assetstore.unity.com/> (besucht am 14.08.2023).
- [354] Aylin Uzun und Bela Mutschler. „Virtual Reality – Überblick und Grundlagen“. In: *Ereignishorizont Digitalisierung* (2020). URL: <https://ereignishorizont-digitalisierung.de/future-shit/virtual-reality-ueberblick-und-grundlagen/> (besucht am 24.02.2023).
- [355] Martine J. van Bennekom u. a. „A Virtual Reality Game to Assess Obsessive-Compulsive Disorder“. In: *Cyberpsychology, behavior and social networking* 20.11 (2017), S. 718–722. DOI: 10.1089/cyber.2017.0107.
- [356] Frederic Vester. *Denken, Lernen, Vergessen: Was geht in unserem Kopf vor, wie lernt das Gehirn, und wann läßt es uns im Stich?* 38. Auflage, aktualisierte Neuauflage. Bd. 33045. dtv dtv-Sachbuch. München: dtv, 2018. ISBN: 3423330457.
- [357] YAW VR. „Yaw2 - YAW VR“. In: *YAW VR* (2021). URL: <https://shop.yawvr.com/> (besucht am 04.08.2023).
- [358] VRcompare. *bHaptics TactSuit X40: Full Specification - VRcompare*. 2023. URL: <https://vr-compare.com/accessory/bhapticstactsuitx40> (besucht am 29.04.2023).
- [359] VRgluv. *VRgluv | Force Feedback Haptic Gloves for VR Training*. 2022. URL: <https://www.vrgluv.com/> (besucht am 05.01.2022).

- [360] VRGO. *VRGO - The VR Chair*. 2019. URL: <http://www.vrgochair.com/> (besucht am 06.01.2022).
- [361] VRGOmini. *VR Locomotion | VRGO mini*. 2022. URL: <https://www.vrgomini.com/> (besucht am 06.01.2022).
- [362] VRScout. *BHaptics Announces \$299 VR Haptic Gloves - VRScout*. 2021. URL: <https://vrscout.com/news/bhaptics-announces-consumer-friendly-vr-haptic-gloves/> (besucht am 06.01.2022).
- [363] VRScout. *High Fidelity Teams With NeoSensory For 'Exoskin' Haptic Jacket - VRScout*. 2018. URL: <https://vrscout.com/news/high-fidelity-neosensory-exoskin-haptic-jacket/> (besucht am 05.01.2022).
- [364] WaveWear. *WaveWear | Compression Sportswear with Integrated Kinesiology Tape*. 2023. URL: https://wavewear.cc/?conversationId=Zbct4A-Wi_GFdZAZGbXpC_oVfxyhZenfY5JDTedFK6g&source=returnToStoreCta&syclid=cj1bu0qusvihtevej400 (besucht am 27.07.2023).
- [365] WaveWear. *WorkoutForFun*. 2023. URL: <https://wavewear.cc/pages/workoutforfun> (besucht am 04.08.2023).
- [366] WDallgraphics. *Tarantula Animated*. 2023. URL: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/animals/insects/tarantula-animated-186189> (besucht am 13.07.2023).
- [367] Jürgen Wehner. *Rezeptoren der Haut*. 2022. URL: <http://www.medizinfo.de/hautundhaar/anatomie/rezeptor.htm> (besucht am 26.01.2022).
- [368] Tzu-Yun Wei u. a. „ElastiLinks: Force Feedback between VR Controllers with Dynamic Points of Application of Force“. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Hrsg. von Shamsi Iqbal. ACM Digital Library. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2020, S. 1023–1034. ISBN: 9781450375146. DOI: 10.1145/3379337.3415836.
- [369] Marta Weniger. „Empathie und Objekt“. Masterthesis, Hochschule Pforzheim. 2019. URL: https://www.hs-pforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur/Forschung/heedPF/Dokumente/Empathie_und_Objekt_FIN.pdf.
- [370] Sven Wernicke. „MMOne Project“. In: *GamingGadgets.de* (2017). URL: <https://gaminggadgets.de/mmone-project-kotzen-mit-trackmania-turbo> (besucht am 04.08.2023).

- [371] DIMDI 1994 - 2013 WHO. *DIMDI - ICD-10-WHO Version 2013*. 2019. URL: <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-who/kode-suche/htmlamt12013/block-f40-f48.htm> (besucht am 06.03.2023).
- [372] Brenda K. Wiederhold, Giuseppe Riva und José Gutiérrez-Maldonado. „Virtual Reality in the Assessment and Treatment of Weight-Related Disorders“. In: *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 19.2 (2016), S. 67–73. ISSN: 2152-2723. DOI: 10.1089/cyber.2016.0012.
- [373] Julia Wieduwildt. „Evaluation von Datenhandschuhen am Beispiel einer virtuellen OP-Situation“. Bachelorarbeit. Universität Siegen, 2021.
- [374] Kyle Wiggers. „The HoloSuit delivers full-body tracking in a compact package“. In: *VentureBeat* (2018). URL: <https://venturebeat.com/business/the-holo-suit-delivers-full-body-tracking-in-a-compact-package/> (besucht am 04.08.2023).
- [375] John Wiley. *Reizaufnahme und -weiterleitung - Chemgapedia*. 2022. URL: http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/8/bc/vlu/neurotransmission/neuro_reize.vlu/Page/vsc/de/ch/8/bc/neurotransmission/reizleitung.vscml.html (besucht am 28.01.2022).
- [376] Markus Antonius Wirtz. *Psychotherapie im Dorsch Lexikon der Psychologie*. 2022. URL: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/psychotherapie>.
- [377] Markus Antonius Wirtz. *Tiefenpsychologisch fundierte Psychotherapie – Dorsch - Lexikon der Psychologie*. 2022. URL: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/tiefenpsychologisch-fundierte-psychotherapie> (besucht am 23.02.2023).
- [378] Bob G. Witmer und Michael J. Singer. „Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 7.3 (1998), S. 225–240. ISSN: 1054-7460. DOI: 10.1162/105474698565686.
- [379] Nele A. J. de Witte u. a. „Augmenting Exposure Therapy: Mobile Augmented Reality for Specific Phobia“. In: *Frontiers in Virtual Reality* 1 (2020). DOI: 10.3389/frvir.2020.00008.
- [380] Woojer. *Strap*. 2021. URL: <https://www.woojer.com/pages/strap> (besucht am 29.12.2021).
- [381] Woojer. *Strap 3*. 2023. URL: <https://www.woojer.com/products/strap-3> (besucht am 04.08.2023).

- [382] Woojer. *Vest*. 2021. URL: <https://www.woojer.com/pages/vest> (besucht am 29.12.2021).
- [383] Woojer. *Vest 3*. 2023. URL: <https://www.woojer.com/products/vest-3> (besucht am 04.08.2023).
- [384] Woojer. *Woojer*. 2021. URL: <https://www.woojer.com/> (besucht am 29.12.2021).
- [385] WordPress. *Geschichte*. 2019. URL: <https://vrdummies.org/virtual-reality/geschichte/> (besucht am 24.09.2019).
- [386] Tae-Heon Yang u. a. „Magnetorheological Fluid Haptic Shoes for Walking in VR“. In: *IEEE transactions on haptics* 14.1 (2021), S. 83–94. DOI: 10.1109/TOH.2020.3017099.
- [387] YAW VR. *Yaw1 PRO edition - YAW VR*. 2022. URL: <https://shop.yawvr.com/product/yaw1-pro-edition/> (besucht am 24.03.2023).
- [388] M. Zhou u. a. „Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition“. In: *Surgical endoscopy* 26.4 (2012), S. 1128–1134. ISSN: 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-011-2011-8. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22044975/>.
- [389] Ruth Zingerle. „Liebevoller Berührung in der Depressionstherapie Eine quantitative Studie zu den Effekten von Lomi Lomi Nui auf Frauen mit Depressionen.“ In: (). URL: <https://netlibrary.aau.at/obvuklhs/content/titleinfo/2409950/full.pdf> (besucht am 08.02.2022).