

# Generierung und Evaluation multisensorischer Stimuli in virtuellen Welten

Dissertation

eingereicht an der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

von

**Julia Fröhlich**

März 2014

Universität Bielefeld, Technische Fakultät  
Universitätsstr. 25  
33615 Bielefeld

# Generierung und Evaluation multisensorischer Stimuli in virtuellen Welten

Julia Fröhlich

AG Wissensbasierte Systeme (Künstliche Intelligenz)

Technische Fakultät

Universität Bielefeld

Postfach 10 01 31

D-33501 Bielefeld

Germany

E-Mail: [jfroehli@techfak.uni-bielefeld.de](mailto:jfroehli@techfak.uni-bielefeld.de)

Von der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation.

Dekan der Fakultät:

Prof. Dr. Mario Botsch

Gutachter:

Prof. Dr. Ipke Wachsmuth

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Einreichung der Arbeit: 11. März 2014

Tag der Verteidigung: 16. Juli 2014

Die offizielle Druckversion wurde auf alterungsbeständigem Papier gemäß DIN-ISO 9706 gedruckt.

# Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Ipke Wachsmuth sehr danken. Schon früh während meines Studiums hast du an mich geglaubt und mir danach die Chance gegeben, in diesem spannenden Bereich und in der tollen Arbeitsumgebung zu promovieren. Herzlichen Dank für deine Unterstützung, deine Ratschläge und die konstruktiven Gespräche. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens und die damit verbundenen hilfreichen Anmerkungen. Außerdem danke ich den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Prof. Dr. Jens Stoye und Dr.-Ing. Björn Sommer.

Ein besonderer Dank gilt den Kollegen aus der AG WBS, insbesondere Nikita Mattar, Felix Hülsmann, Nico Lüdike und Patrick Renner, denn die Zusammenarbeit mit euch hat diese Arbeit erst ermöglicht. Ich danke der ganzen AG für die angeregten Diskussionen, hilfreichen Kommentare und für die Aufmunterung an schlechten Tagen. Es war mir immer eine große Freude, ein Teil dieser Gruppe zu sein.

Ein herzlicher Dank geht an alle, die mich in dieser Zeit unterstützt und an mich geglaubt haben. Jessi, Marc, Angela, Pascal, Stefan, Markus und Co – danke dass ihr mir die schönen Momente neben der Arbeit ermöglicht habt und so viel Verständnis hattet, sogar als ich zeitweise ganz abgetaucht war. Anne, Sonja und Steffi, ihr seid die beste Peer-Gruppe der Welt, danke für alles. Der größte Dank gilt meinem Mann Christian: du hast immer an mich geglaubt, mich so gut unterstützt wie es nur geht, mir so viel Rückhalt und all deine Liebe gegeben. Du hast all die Steine, die mir in den Weg geworfen wurden, wie selbstverständlich weggeräumt, einen besseren Partner kann man sich nicht wünschen. Ich liebe dich sehr!





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	4
1.2. Fragestellung und Zielsetzung . . . . .	5
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	7
<b>2. Grundlagen der Wahrnehmung und Generierung virtueller Welten</b>	<b>9</b>
2.1. Virtuelle Realität . . . . .	10
2.1.1. Immersion und Präsenz . . . . .	14
2.1.2. Messverfahren für Präsenz . . . . .	17
2.1.3. Wissensbasen für virtuelle Welten . . . . .	23
2.2. Wahrnehmung und Generierung multisensorischer Stimuli . . . . .	26
2.2.1. Visuelle Stimuli . . . . .	28
2.2.2. Auditiv Stimuli . . . . .	30
2.2.3. Haptische Stimuli . . . . .	33
2.2.4. Olfaktorische und gustatorische Stimuli . . . . .	34
2.3. Zusammenfassung . . . . .	36
<b>3. Verwandte Arbeiten</b>	<b>37</b>
3.1. Multisensorische Stimulation . . . . .	38
3.1.1. Akustische Ausgaben . . . . .	40

3.1.2.	Natürliche Interaktion . . . . .	41
3.1.3.	Wind . . . . .	43
3.1.4.	Wärme . . . . .	45
3.2.	Intelligente virtuelle Welten . . . . .	48
3.3.	Zusammenfassung . . . . .	50
<b>4.</b>	<b>Technische Integration multisensorischer Stimuli</b>	<b>51</b>
4.1.	Arbeitsumgebung ohne multisensorische Ausgaben . . . . .	52
4.2.	Anforderungen . . . . .	53
4.3.	Das Soundsystem . . . . .	54
4.3.1.	Konzeption . . . . .	55
4.3.2.	Realisierung . . . . .	57
4.3.3.	Implementierung . . . . .	58
4.3.4.	Zusammenfassung . . . . .	62
4.4.	Physikalische Interaktion mit taktilen Stimuli . . . . .	63
4.4.1.	Hardware . . . . .	63
4.4.2.	Konzeption . . . . .	65
4.4.3.	Realisierung . . . . .	66
4.4.4.	Implementierung . . . . .	67
4.4.5.	Zusammenfassung . . . . .	69
4.5.	Das Windsystem . . . . .	70
4.5.1.	Hardware . . . . .	70
4.5.2.	Konzeption . . . . .	72
4.5.3.	Realisierung und Implementierung . . . . .	73
4.5.4.	Zusammenfassung und Erweiterungen . . . . .	74
4.6.	Multisensorische Integration . . . . .	76
4.7.	Diskussion . . . . .	77
<b>5.</b>	<b>Wissensbasierte Generierung virtueller Welten</b>	<b>81</b>
5.1.	Motivation . . . . .	82
5.2.	Ein wissensbasierter Ansatz zur Generierung multisensorischer Stimuli . .	84
5.2.1.	Extraktion semantischer Annotationen . . . . .	85
5.2.2.	Abgleich mit einer Wissensbasis . . . . .	86
5.2.3.	Wissensbasierte Generierung multisensorischer Stimuli . . . . .	88

5.2.4. Resultierendes Konzept . . . . .	89
5.3. Implementierung . . . . .	91
5.4. Beispielszenario . . . . .	93
5.5. Transfer . . . . .	95
5.6. Diskussion . . . . .	96
<b>6. Evaluation der Auswirkung multisensorischer Stimuli</b>	<b>99</b>
6.1. Versuchsaufbau . . . . .	100
6.1.1. Interaktion und Navigation . . . . .	100
6.1.2. Die virtuelle Umgebung . . . . .	103
6.2. Versuchsdurchführung . . . . .	106
6.2.1. Messverfahren . . . . .	106
6.2.2. Versuchspersonen . . . . .	108
6.2.3. Ablauf . . . . .	109
6.3. Ergebnisse . . . . .	112
6.3.1. Ergebnisse der subjektiven Präsenzmessung . . . . .	112
6.3.2. Ergebnisse der objektiven Präsenzmessung . . . . .	115
6.3.3. Weitere Ergebnisse . . . . .	117
6.4. Interpretation . . . . .	117
6.5. Diskussion . . . . .	119
<b>7. Integration eines autonomen Agenten</b>	<b>121</b>
7.1. Motivation . . . . .	122
7.1.1. Virtuelle Agenten . . . . .	123
7.2. MAX als Laborführer – Ein Beispielszenario . . . . .	126
7.2.1. Exemplarischer Ablauf . . . . .	126
7.3. Diskussion . . . . .	129
7.3.1. Vorschlag zur Evaluation . . . . .	129
7.3.2. Wissensbasierte Integration . . . . .	131
7.4. Zusammenfassung . . . . .	132
<b>8. Resümee</b>	<b>135</b>
8.1. Ergebnisse . . . . .	135
8.2. Fazit . . . . .	138
8.3. Ausblick . . . . .	139

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>
<b>Anhang</b>	<b>157</b>
<b>Anhang A. Originalfragebögen</b>	<b>159</b>
<b>Anhang B. Material der durchgeführten Studie</b>	<b>165</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Virtuelle Realität in den 1980ern: Visionen und Umsetzung. . . . .	2
1.2.	Aktuelle virtuelle Welten und Techniken . . . . .	3
2.1.	Das Sensorama von Morton Heilig . . . . .	11
2.2.	NASA Goggles und VPL Gloves . . . . .	12
2.3.	Hintergrund des Einsatzes von NASA Goggles und VPL Gloves. . . . .	13
2.4.	Multimodale Interaktion in der virtuellen Werkstatt . . . . .	14
2.5.	Der AIP-Würfel . . . . .	16
2.6.	Ein Versuchsaufbau mit virtuellem Abgrund . . . . .	22
2.7.	Unterteilung der menschlichen Sinne . . . . .	27
2.8.	Unterschiedliche Geräte zur Darstellung visueller virtueller Welten . . . . .	29
2.9.	Eingabegeräte mit haptischem Feedback . . . . .	34
2.10.	Olfaktorische Displays für virtuelle Welten. . . . .	35
3.1.	Beispielhafte Integration von Wind in VR-Szenarien . . . . .	44
3.2.	Hardwareoptionen zur Generierung von Wärme . . . . .	46
4.1.	Technische Infrastruktur der AG WBS (Stand 2008) . . . . .	52
4.2.	Veranschaulichung der Aufgabe eines Soundsystems . . . . .	55
4.3.	Realisierungsvorschlag für eine akustische Ausgabe . . . . .	57
4.4.	Übersicht der implementierten akustischen Ausgabe. . . . .	58
4.5.	Auswahl der geeigneten Lautsprechertripel mittels VBAP . . . . .	61
4.6.	Technische Evaluation des Soundservers . . . . .	63
4.7.	Eingabegeräte der AG WBS . . . . .	64

4.8. Drei Aufgaben zur Bereitstellung einer natürlichen Interaktion . . . . .	65
4.9. Realisierungsvorschlag, um natürliche Interaktion zu ermöglichen . . . . .	67
4.10. Technische Evaluation der physikalischen Objekte . . . . .	69
4.11. Installation der Ventilatoren . . . . .	71
4.12. Verwendete und installierte Hardware zur Generierung von Wind. . . . .	71
4.13. Technische Evaluation des Wind- und Wärmesystems . . . . .	75
4.14. Technische Evaluation des entwickelten Gesamtsystems . . . . .	77
4.15. Ausschnitt das resultierende Gesamtsystems . . . . .	78
5.1. Informationen eines virtuellen Objektes . . . . .	83
5.2. Konzept einer wissensbasierten Generierung multisensorischer Stimuli . . . . .	84
5.3. Illustration der symbolischen Repräsentation virtueller Objekte . . . . .	85
5.4. Implementierte wissensbasierte Soundkomponente . . . . .	91
5.5. Veranschaulichung der Implementierung des wissensbasierten Konzepts . . . . .	92
6.1. Darstellung verschiedener Navigationsverfahren in virtuellen Welten . . . . .	102
6.2. Die präsentierte virtuelle Welt in der Benutzerstudie . . . . .	104
6.3. Objektives Messverfahren, dargestellt anhand der Hautleitfähigkeit . . . . .	111
6.4. Kombinierte Auswertung der Präsenz-Fragen . . . . .	113
6.5. Einzelne Auswertung der Präsenz-Fragen . . . . .	114
6.6. Vergleich der Mittelwerte der Pulsmessung . . . . .	115
6.7. Das unheimliche Tal (“uncanny valley”) nach [Mori et al., 2012] . . . . .	118
7.1. Autonomie im AIP-Würfel . . . . .	122
7.2. Der virtuelle Agent MAX und seine zugrunde liegende Architektur . . . . .	124
7.3. MAX in virtuellen Welten . . . . .	125
7.4. Begrüßung durch MAX auf der Hover-Disk . . . . .	127
7.5. Bildhafte Darstellung der virtuellen Laborführung. . . . .	128
7.6. Beispielszenario der wissensbasierten Integration eines virtuellen Agenten . . . . .	132
7.7. Illustration der Integration virtueller Agenten im AIP-Würfel . . . . .	133
8.1. Illustration der geleisteten Arbeiten anhand des AIP-Würfels . . . . .	139

# Tabellenverzeichnis

3.1. Vergleich der Hardware zur Erzeugung von Temperaturstimuli . . . . .	48
4.1. Implementierte Felder für einen <Soundnode> . . . . .	59
4.2. Die Stufen der Beaufortskala . . . . .	74
6.1. Präsentierte Stimuli in den vier Konditionen . . . . .	106
6.2. Übersicht der Teilnehmerstruktur . . . . .	109
6.3. Daten der Präsenzauswertung . . . . .	116





# Listings

4.1. Beispiel für einen eingebundenen <code>&lt;Soundnode&gt;</code> . . . . .	60
4.2. Beispiel eines eingebundenen dynamischen Objekts . . . . .	68
5.1. Implementierung eines virtuellen Föns ohne wissensbasierte Generierung	94
5.2. Implementierung eines virtuellen Föns mit wissensbasierter Generierung .	95



# Kapitel 1

## EINLEITUNG

**Virtuelle Realität**<sup>1</sup> begann ihre Erfolgsgeschichte in den 1980er Jahren. Die Vorstellung, in eine alternative Realität abtauchen zu können, wurde mit großer Begeisterung aufgenommen. Zukunftsvisionen, in denen jederzeit ein Helm aufgesetzt oder ein Holo-deck wie in Star Trek betreten werden kann, um **virtuelle Welten** zu besuchen, waren omnipräsent. Ideen dieser Art gab es schon weit vorher, genau wie erste prototypische Umsetzungen, doch durch den technischen Fortschritt der 1980er Jahre erschienen solche Visionen greifbar.

Stanislaw Lem erschuf 1964 in seiner *Summa Technologiae* mit der sogenannten Phantomatik eine Vision der VR [Lem, 1976]. Ivan Sutherland beschrieb 1965 sehr anschaulich, wie eine ultimative virtuelle Realität aussehen könnte:

*“The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked” [Sutherland, 1965](S.508).*

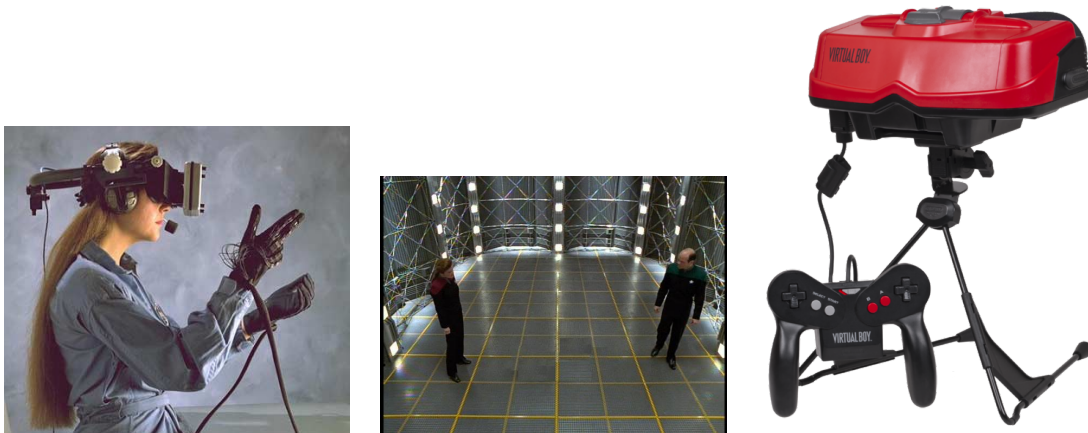
Der Begriff Virtuelle Realität selbst wurde von Jaron Lanier, einem Pionier dieser Disziplin, geprägt [Lanier, 1992] und wird in Kapitel 2 näher definiert. Mitte der 1990er Jahre wurden die ersten kommerziellen Produkte vermarktet. Das Interesse auf dem Markt war vorhanden, aber die Entwicklungen konnten auf der technischen Seite die

---

<sup>1</sup>auch **Virtual Reality**; kurz **VR**

## 1. EINLEITUNG

---



(a) Ein virtuelles Trainings- (b) Das Holodeck in Star (c) Nintendos Virtual Boy  
szenario der NASA Trek (1987)<sup>4</sup>.  
(1980)<sup>3</sup>. (1995).

Abbildung 1.1.: Virtuelle Realität in den 1980ern: Visionen und Umsetzung.

Erwartung nicht erfüllen. Sehr hohe Preise trugen zudem dazu bei, dass keine allgemeine Zugänglichkeit erreicht wurde. Damit nahm die Euphorie in der Öffentlichkeit ab, aber das Forschungsinteresse blieb. Abbildung 1.1 zeigt sowohl Beispiele für die damaligen Visionen als auch ein erstes Produkt.

Auch heute sind wir noch entfernt von einer kostengünstigen und absolut realistischen virtuellen Realität, die jedermann zugänglich ist. Dennoch bieten aktuell verfügbare Systeme ein breites Spektrum an Möglichkeiten (vgl. Abbildung 1.2). Die Einsatzgebiete sind vielfältig und werden immer weiter ausgebaut. Bekannte Beispiele finden sich in der Produktentwicklung, insbesondere bei Automobilherstellern, in Trainingsszenarien, beispielsweise für Piloten und Astronauten, oder in der Unterhaltungsindustrie. Die meisten dieser Systeme haben allerdings eher pragmatische Ziele. Häufig werden sie für eine bestimmte Zielgruppe entworfen, die ein spezielles Training bekommt, und bleiben ungeübten Besuchern verschlossen. Eine wirkliche **Einbettung des Menschen** in das System wird selten realisiert. Doch gibt es immer mehr Bestrebungen, virtuelle Welten besser zugänglich zu machen. Dazu gehört auf der einen Seite die Bereitstellung von kostengünstiger Hard- und Software. Auf der anderen Seite soll aber auch die Bedienung vereinfacht werden.

---

<sup>3</sup>Bildrechte: NASA / W. Sisler, S. Fisher, 1988

<sup>4</sup>Bildrechte: Paramount Pictures / CBS Television Studios



(a) Die Biosphere (Bielefeld AG WBS, 2011). (b) Eine neue CAVE an der RWTH Aachen (2012)<sup>5</sup>. (c) VR-Trainingsimulation der NASA (2012)<sup>6</sup>.

Abbildung 1.2.: Aktuelle virtuelle Welten und Techniken

Um ein möglichst gutes Ergebnis in dem jeweiligen Einsatzgebiet zu erzielen, sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. So sollen unter anderem neue Hardwarekomponenten entworfen, Navigation und Interaktion verbessert und weitere Ausgabekanäle einbezogen werden. Viele Jahre stand hauptsächlich die Verbesserung der grafischen Ausgabequalität im Fokus der VR-Forschung. Die optische Wahrnehmung wurde als primärer Sinn gesehen und galt als Schlüssel zur Präsentation einer virtuellen Welt. Weitere Sinneseindrücke (insbesondere akustische und haptische) wurden häufig aus Zeit- und Kostengründen nur in geringem Umfang einbezogen. Die einzelnen Bestrebungen schließen sich aber nicht gegenseitig aus, vielmehr ist das Ziel, auf allen Ebenen ein möglichst umfassendes System zu entwickeln.

## Forschungskontext

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme (Künstliche Intelligenz) (kurz: AG WBS) unter der Leitung von Prof. Dr. Ipke Wachsmuth an der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld. Angesiedelt zwischen Künstlicher Intelligenz und Virtueller Realität bietet sich hier seit Mitte der 1990er Jahre eine Arbeitsumgebung für intelligente Computergrafik.

Vorangegangene Arbeiten und Projekte in der AG WBS bilden eine breit gefächerte Grundlage. Dabei nahm die multimodale Interaktion einen hohen Stellenwert ein (siehe z.B.: [Jung et al., 2000], [Latoschik, 2001], [Jung et al., 2002]). Andere Arbeiten befassten sich mit der Einbettung des Benutzers ([Pfeiffer und Latoschik, 2007]). Schon 1998 entwickelte Ralf Nolte ein prototypisches Raumklangsystem zum Einsatz in VR

<sup>5</sup><http://www.rz.rwth-aachen.de/>

<sup>6</sup>Bildrechte: NASA Desert RATS / Fotograf: Bill Stafford

[Nolte, 1998], welches so portabel entworfen wurde, dass es sowohl an unterschiedliche Computerhardware, wie auch an unterschiedliche Wiedergabesysteme angepasst werden konnte. Sehr früh wurde auch die Verbindung von Methoden der Künstlichen Intelligenz mit virtuellen Welten in mehreren Systemen erprobt (siehe u.a.: [Wachsmuth und Cao, 1995], [Wachsmuth et al., 1995], [Biermann et al., 2002]). In dem Projekt CODY wurde zum Beispiel eine Wissensbasis genutzt, um die Montage von virtuellen Bauteilen zu ermöglichen, indem die Objekte mit einer logischen Beschreibung angereichert wurden [Jung et al., 1995]. Aufbauend auf den Leistungen der vorherigen Projekte wurden in allen diesen Richtungen im Rahmen dieser Arbeit Erweiterungs- und Ergänzungsmöglichkeiten erforscht.

### 1.1. Motivation

Trotz sehr realistischer grafischer Darstellungen und ausgereifter Interaktionsgeräte und -verfahren gelingt es aktuellen virtuellen Welten nicht, ihre Besucher vollends zu überzeugen. Der Besucher einer virtuellen Welt soll also möglichst **präsent** sein. Eine Definition der genauen Bedeutung von Präsenz erfolgt in Kapitel 2. Das Ziel sollte sein, nicht zwischen der virtuellen und der realen Welt unterscheiden zu können – ein “Holodeck” zu erschaffen. Dieses Ziel ist auch mit modernen Systemen noch nicht erreicht worden. **Neue Wege der Stimulation** können eine Möglichkeit sein, die Präsenz der Besucher (durch das Ansprechen weiterer Sinne) zu verbessern. Im Fokus stehen dabei insbesondere die akustische Ausgabe, aber auch weitere Modalitäten sollen betrachtet werden. Dieses Vorgehen bietet zwei große Vorteile: Auf der einen Seite kann die virtuelle Welt realistischer modelliert werden, wenn nicht nur das Visuelle, sondern zum Beispiel auch der Klang, der Geruch oder die Temperatur wiedergegeben werden; auf der anderen Seite kann der Besucher mit mehr Sinnen, die virtuell angesprochen werden, die reale Welt des umgebenden Labors stärker ausblenden. Beides zusammen ermöglicht ein wirkliches Eintauchen in die virtuelle Welt. Dazu ist es einerseits nötig, die unterschiedlichen Ausgabekanäle und deren Auswirkung auf den Menschen zu untersuchen, zugleich aber auch die Realisierbarkeit im Blick zu behalten. Viele Projekte scheinen auf zusätzliche Ausgaben zu verzichten, weil dies einen zu hohen Arbeitsaufwand bedeutet. Dementsprechend ist es wichtig, Verfahren zu finden, die **den zusätzlichen Aufwand minimieren**. In der vorliegenden Dissertation sollen systematische und übertragbare Verfahren entwi-

ckelt werden, mit deren Hilfe multisensorische Stimuli in virtuellen Welten mit geringem Aufwand generiert werden können.

## 1.2. Fragestellung und Zielsetzung

Aus dem Vorangegangenen geht hervor, dass ein Hauptziel virtueller Welten ist, beim menschlichen Besucher eine möglichst hohe Präsenz hervorzurufen. Eine dabei noch nicht voll ausgeschöpfte Möglichkeit liegt in der multisensorischen Integration – es sollen so viele Sinne wie möglich angesprochen werden. Daraus ergibt sich das übergeordnete Ziel der vorliegenden Dissertation:

Es soll ein System zur Generierung multisensorischer Stimuli entwickelt werden, deren Auswirkungen auf die Besucher evaluiert werden. Der Arbeitsaufwand zur Erstellung dieser Ausgaben soll möglichst gering gehalten werden.

Folgende Fragen sollen in diesem Zusammenhang beantwortet werden:

**Frage 1** Wie können **multisensorische Stimuli** in virtuelle Welten integriert werden?

**Frage 2** Wie kann der benötigte **Arbeitsaufwand** bei der Entwicklung multimodaler virtueller Welten gering gehalten werden?

**Frage 3** Wie kann **evaluiert** werden, wie sich multisensorische Stimuli auf die Präsenz auswirken?

Um das Ziel zu erreichen und die gestellten Fragen zufriedenstellend zu beantworten, müssen unterschiedliche Probleme gelöst werden. Im Folgenden werden dazu drei Teilziele formuliert:

**Teilziel 1** Um die unterschiedlichen Sinne des Menschen anzusprechen, sollen entsprechende Ausgabemöglichkeiten technisch integriert werden. Das resultierende System soll folgende Anforderungen erfüllen:

**Effizienz** Die Ausgabe der Stimuli soll in Echtzeit erfolgen und mit wenigen zusätzlichen Rechenressourcen auskommen.

**Natürlichkeit** Die generierten Ausgaben sollen möglichst natürlich sein und wahrnehmungsphysiologischen Erkenntnissen entsprechen.

**Vollständigkeit** Die Ausgaben sollen ein möglichst umfassendes Spektrum an real auftretenden Phänomenen abdecken.

**Teilziel 2** Es soll ein Softwareframework entwickelt werden, das die Generierung multisensorischer Stimuli mit möglichst wenig Arbeitsaufwand ermöglicht und folgende Kriterien erfüllt:

**Modularität** Durch die Kapselung in einzelne Module soll gewährleistet werden, dass weitere Funktionalitäten eingebunden werden können und ein Austausch von vorhandenen Modulen leicht zu realisieren ist.

**Portabilität** Das entwickelte Framework soll nicht auf sehr spezielle technische Voraussetzungen angewiesen sein und leicht in eine andere Umgebung übertragen werden können.

**Gebrauchstauglichkeit** Im möglichen Rahmen sollen die drei Kriterien der Gebrauchstauglichkeit (Effektivität, Effizienz, Zufriedenheit) berücksichtigt werden [ISO/IEC, 1998].

**Teilziel 3** Es soll empirisch untersucht werden, wie sich die multisensorischen Stimuli auf die Präsenz der Besucher auswirken. Folgende Anforderungen sollen dabei berücksichtigt werden:

**Gütekriterien** Die drei Gütekriterien für psychologische Tests (Objektivität, Reliabilität und Validität) sollen erfüllt werden.

**Vergleichbarkeit** Das Design der Studie muss der gängigen Versuchspraxis entsprechen, damit sich die Ergebnisse mit denen ähnlicher Studien vergleichen lassen.

**Nützlichkeit** Die Ergebnisse sollen Hinweise und Empfehlungen geben, um ähnliche Systeme zu entwickeln oder zu verbessern.



## 1.3. Aufbau der Arbeit

Nach dieser Einleitung werden in **Kapitel 2** die Grundlagen der Wahrnehmung und Generierung virtueller Welten zusammengefasst. Dabei wird betrachtet, wie multisensorische Stimuli in der Vergangenheit in virtuellen Welten umgesetzt wurden. Damit zusammenhängende Theorien und Evaluationsmöglichkeiten werden dargelegt. Zusätzlich werden die Funktionsweise des menschlichen Wahrnehmungsapparats und darauf aufbauend die technischen Möglichkeiten der Stimulation vorgestellt. In **Kapitel 3** werden verwandte Arbeiten aus den relevanten Themengebieten und ihre Bedeutung für die vorliegende Dissertation erörtert.

Aufbauend auf den Grundlagen und verwandten Arbeiten wird in den anschließenden Kapiteln der eigene Lösungsansatz für die drei Teilprobleme (s.o.) vorgestellt. **Kapitel 4** legt die technische Integration von Ausgabemöglichkeiten für multisensorische Stimuli in ein VR-System vor. Dabei steht zu Beginn eine akustische Ausgabe im Fokus, von der ausgehend die Anbindung weiterer sensorischer Modalitäten erfolgt. Das resultierende Gesamtsystem besteht aus einem Soundsystem, taktilen Ausgaben über Datenhandschuhe, einem Windsystem und einem Wärmesystem. Für jeden Stimulus werden die erarbeiteten Konzepte, Realisierungsvorschläge und die durchgeführte Implementierung vorgestellt. Der technische Aufwand für die Erstellung und Integration der entwickelten Systeme sowie die technischen Evaluationen zur Leistungsfähigkeit werden abschließend diskutiert.

**Kapitel 5** stellt das entwickelte Softwareframework zur Minimierung des benötigten Arbeitsaufwands vor. Der Einsatz wissensbasierter Methoden zur Anreicherung virtueller Objekte führt zu einem System, das den gesetzten Anforderungen (Modularität, Portabilität, Gebrauchstauglichkeit) gerecht wird und sowohl in bereits vorhandene wie auch neu entwickelte virtuelle Welten mit geringem Arbeitsaufwand multisensorische Stimuli integrieren kann.

Um Informationen über die Auswirkung von multisensorischen Stimuli auf die Präsenz zu erhalten, wurde eine Nutzerstudie durchgeführt, welche in **Kapitel 6** dargelegt wird. Nach einer Beschreibung des Versuchsaufbaus und -ablaufs werden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert. **Kapitel 7** beschreibt die zusätzliche Integration eines autonomen Agenten innerhalb eines Beispielszenarios. Hierfür konnte nur ein exemplarischer Ansatz umgesetzt werden, sodass ausgehend von der prototypischen Integration eine Generalisierungsmöglichkeit betrachtet wird.

## 1. EINLEITUNG

---

In **Kapitel 8** erfolgt ein Resümee, in dem die gesetzten Ziele und Anforderungen mit den Ergebnissen abgeglichen werden. Die geleisteten Arbeiten werden in den Forschungskontext eingeordnet, offene Punkte identifiziert und mögliche zukünftige Forschungsfragen diskutiert.

# GRUNDLAGEN DER WAHRNEHMUNG UND GENERIERUNG VIRTUELLER WELTEN

*“Virtual Reality allows you to explore a computer generated world by actually being in it” [Sherman und Judkins, 1992]*

Barrie Sherman und Phil Judkins beschreiben mit dem einleitenden Zitat Virtuelle Realität als **computergenerierte Realität**, bei der zusätzlich **das Gefühl, sich wirklich in dieser Welt zu befinden**, entstehen muss. Die virtuelle Realität ist also eine Computersimulation, die technische Anforderungen hat und sich dennoch zentral an der menschlichen Wahrnehmung ausrichtet. Bewusst werden die Anwender in unserem Labor deshalb Besucher (und nicht wie bei vielen klassischen Computeranwendungen “Benutzer”) genannt, da die persönliche Erfahrung eine wichtige Komponente ist. [Wachsmuth et al., 1994](S. 28) formulierten, dass es sich um ein ganz neues Kommunikationsmedium handelt und “Im Idealfall wird der ”Betrachter“ [...] direkt mit allen ”Sinnen“ in das Geschehen einbezogen”. Daraus entstehen eine ganze Reihe an Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf die Darstellung, die in diesem Kapitel besprochen werden.

### 2.1. Virtuelle Realität

Definitionen des Begriffs Virtuelle Realität gibt es viele – eine Standarddefinition kann nicht genannt werden. Häufig wird bei den Definitionen ein spezieller Aspekt fokussiert:

**Definition 1** (Virtuelle Realität). *[...] eine mittels Computer simulierte Wirklichkeit oder künstliche Welt, in die Personen mithilfe technischer Geräte sowie umfangreicher Software versetzt und interaktiv eingebunden werden [Brockhaus, 1998].*

**Definition 2** (Virtuelle Realität). *Eine Virtuelle Realität ist definiert als eine reale oder simulierte Umgebung, in der ein Wahrnehmender Telepräsenz erfährt [Steuer, 1992].*

**Definition 3** (Virtuelle Realität). *Virtuelle Realität [...] bezeichnet ein neuartiges Kommunikationsmedium, das die unmittelbare Wechselwirkung des Menschen mit rechnergenerierten Darstellungen konkreter oder abstrakter Ereignisse und Sachverhalte erlaubt [Wachsmuth, 1998].*

Definition 1 aus der Brockhaus Enzyklopädie rückt den technischen Aspekt in den Mittelpunkt, während der Besucher nur implizit durch die Formulierungen “versetzt” und “interaktiv” mit einbezogen wird. Steuer (Definition 2) hingegen betrachtet allein das Erlebnis des Besuchers, ohne auf technische Details einzugehen. Der Begriff Telepräsenz (häufig auch **Präsenz** genannt) steht dabei in direktem Zusammenhang mit dem Erlebnis. Dahinter verbirgt sich die Bestrebung, die subjektiv wahrgenommenen Eindrücke, die ein Besucher in einer virtuellen Welt sammelt, messbar zu machen. Somit soll die persönliche Erfahrung in einer virtuellen Welt quantifiziert werden, um sie mit anderen virtuellen Welten vergleichbar zu machen. Abschnitt 2.1.1 wird diese Begrifflichkeiten definieren und erläutern. Definition 3 verknüpft die beiden Teilaspekte und verdeutlicht die dabei stattfindende Wechselwirkung. Eine solche virtuelle Realität bietet viele Einsatzmöglichkeiten (vgl. auch [Wachsmuth, 1994]), die im Folgenden genauer beleuchtet werden sollen.

Ausgehend von meist grafischen virtuellen Welten befasst sich die vorliegende Arbeit mit **Multimodalität**. Der Begriff leitet sich zum einen von dem Wort *multi* (lateinisch: viel) und zum anderen von *modus* (lateinisch: Art und Weise) ab. Im Kontext von virtuellen Welten wird damit die Anzahl der Ein- und Ausgabekanäle bezeichnet. Da dies geschieht um möglichst viele Sinne des Menschen anzusprechen, wird dabei von **multi-sensorischen Stimuli** gesprochen. Die erste vielfältig angereicherte virtuelle Realität

wurde von Morton Heilig bereits 1957 erfunden – das “Sensorama”, ein Simulator zur Präsentation multimodaler virtueller Welten. Der Prototyp wurde 1962 fertig gestellt [Heilig, 1962] und ist auf Abbildung 2.1 dargestellt. Das Sensorama entspricht nicht allen Anforderungen für eine virtuelle Realität, da keine Interaktionsmöglichkeit gegeben war (vgl. Definition 3). Der Besucher konnte passiv einen Film schauen, welcher ihm in stereoskopischer grafischer Darstellung präsentiert und um weitere Ausgaben angereichert wurde. Dazu gehörten zusätzliche akustische Signale (Stereo Sound), Vibrationen und Bewegungen (ähnlich einer Fahrsimulation), Wind und Gerüche. Das große Problem des Sensoramas waren die horrenden Kosten der Filmerstellung, sodass nur sechs Filme à 2 Minuten produziert wurden [Heilig, 2013].



Abbildung 2.1.: Das Sensorama von Morton Heilig [Heilig, 2013] konnte Filme abspielen und zusätzlich Sound, Vibrationen, Bewegungen, Wind und Gerüche ausgeben. Es wird als eins der ersten funktionsfähigen Virtual-Reality-Systeme betrachtet.

Bei der NASA<sup>1</sup> wurde seit Beginn der VR-Forschung viel Hoffnung in die neue Technologie gelegt. Bis heute wird sie genutzt, um eine bessere Astronautenausbildung zu ermöglichen. Viele Forschungserfolge konnten dort verbucht werden. Ein Ziel war es von Beginn an möglichst viele Sinne anzusprechen. Abbildung 2.2 verdeutlicht mehrere Aspekte: Neben der stereoskopischen Projektion mit einem **Head-mounted display**

<sup>1</sup>US-Bundesbehörde für Luft- und Raumfahrt: National Aeronautics and Space Administration



Abbildung 2.2.: Der Einsatz von NASA Goggles und VPL Gloves [Krueger, 1991], im Rahmen eines Astronautentrainings. Die Abbildung suggeriert zudem die zusätzliche Ausgabe von Sound (Kopfhörer), Sprecherkennung (Mikrofon) und Wind (wehende Haare).

(HMD) sind Kopfhörer und Handschuhe zur Interaktion zu erkennen. Die nach hinten wehenden Haare lassen zusätzlich eine Windquelle vermuten und das Mikrofon deutet auf eine Spracherkennung hin. Dieser Funktionsumfang ist für das Jahr 1991 erstaunlich, insbesondere wenn es sich um eine echtzeitfähige Anwendung handelt, die als Trainingssimulation für Astronauten eingesetzt werden kann. Es wirkt wie eine tragbare Version des Sensoramas, mit einer zusätzlichen Interaktionsmöglichkeit.

Interessant ist ein Blick hinter die Kulissen – denn es stellt sich die Frage, wie 1991 ein VR-System mit derartig vielen Funktionen möglich war, während aktuell verfügbare Systeme nicht annähernd über einen vergleichbaren Leistungsumfang verfügen. Abbildung 2.3 verdeutlicht, wie das Foto entstanden ist. Es ist dabei nicht überraschend, dass die damalige Technologie noch nicht so weit war, sondern vielmehr, dass über 20 Jahre weitere Forschung im Gebiet der Virtuellen Realität kein System hervorgebracht haben, welches so viele realistische Ausgabemodalitäten miteinander vereint.

Neben den vorgestellten Bereichen werden die Techniken der virtuellen Realität auch häufig in der **Produktentwicklung** eingesetzt (vgl. u.a. [Gausemeier et al., 2001], [Wang, 2002], [Ostermayer, 2008]). Während sich innerhalb eines effizienten Produktentwicklungsprozesses virtuelle Repräsentationen bereits stark etabliert haben, beschränken sich diese jedoch meistens auf eine grafische Darstellung der beteiligten Objekte. Diese erlauben beispielsweise eine kostengünstige Erstellung von Prototypen (“virtual prototyping” genannt), welche in frühen Phasen der Entwicklung Fehler in der Konzeption und Konstruktion verringern bzw. vermeiden können. [Shen et al., 2005] stellen zum Beispiel ein System vor, das kooperatives virtual prototyping in interdisziplinären Teams erlaubt.



Abbildung 2.3.: Die Entstehung der Abbildung 2.2 verdeutlicht, dass die Idee der multisensorischen Stimuli zwar erwünscht, aber in diesem System nicht einsetzbar war [Krueger, 1991].

In dem von 2001 bis 2007 an der Universität Bielefeld durchgeführten Projekt “Virtuelle Werkstatt” [Jung et al., 2002] wurde ein System entwickelt, in dem Bauteile mit Wissen angereichert werden, um intelligente Verbindungsstellen oder parametrische Veränderungen zu ermöglichen [Latoschik et al., 2005]. Es wurde insbesondere auf eine intuitive multimodale Benutzerschnittstelle Wert gelegt, so dass eine Interaktion mit Gesten und Sprache umgesetzt wurde [Latoschik, 2002]. Eine beispielhafte Interaktion ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

Wegen des erhöhten Entwicklungsaufwands, der mit zusätzlichen Generierung multisensorischer Stimuli verbunden ist, werden diese häufig nicht berücksichtigt. Ein Beispiel, das akustische Produkteigenschaften inkludiert, stellte [Husung, 2012] vor. Bei vielen technischen Produkten, die virtuell getestet werden, ist eine Abschätzung von Betriebsgeräuschen interessant. Mittels einer Simulation der Klangeigenschaften kann beispielsweise die Belastung für bedienende Personen erprobt werden, um geltende Vorschriften nach [ISO/IEC, 1996] einzuhalten. Wichtige Informationen beim Training mit sicherheitskritischen Apparaturen können ebenfalls simuliert werden, wie akustische Warnsignale, die Wärmeentwicklung, die Vibrationen oder die Oberflächenstruktur. Um das Erlebnis in der virtuellen Welt realer zu gestalten, ist es wünschenswert, geeignete und effiziente Methoden zur Simulation dieser Eigenschaften bereit zu stellen.

Wie stark ein Anwender das Gefühl hat, die VR sei wie die Realität, lässt sich mit den Termini **Immersion und Präsenz** beschreiben, die im Folgenden näher bestimmt werden.



Abbildung 2.4.: Multimodale Interaktion in der “Virtuellen Werkstatt” mittels VPL-Cybergloves und Spracherkenner. Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Projekt wurde von 2001 bis 2007 in der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme der Universität Bielefeld durchgeführt.

### 2.1.1. Immersion und Präsenz

Das Gefühl in eine virtuelle Welt einzutauchen wird auch Präsenz genannt. Die Beweggründe dem Anwender Präsenz zu vermitteln sind vielfältig und hängen mit den Zielen der Anwendung zusammen. In Trainingsszenarien ist der gewünschte Lerneffekt beispielsweise höher, wenn der Besucher präsent ist. Die Begriffe Präsenz und Immersion sind etwa nach der Definition 2 konstitutiv für die Definition der VR, aber bisher nicht standardisiert definiert. Über die Definition der Präsenz und der Immersion wird so auch der Begriff der VR näher bestimmt werden. Die “International Society for Presence Research” (ISPR) versucht eine übergeordnete Plattform zum Austausch bereit zu stellen [ISPR, 2010]. Auf ihrer Webseite findet sich ein Anhaltspunkt für eine Definition, bestehend aus 12 Kernaussagen und über 2700 Worten. Daraus lässt sich schließen, wie schwierig es ist, eine allgemeingültige Definition zu finden, die allen zu beachtenden Aspekten gerecht wird. Zwei häufig verwendete Definitionen stammen von Regenbrecht und Schuemie:



**Definition 4** (Immersion). *“Immersion beschreibt alle Voraussetzungen, die die Präsenz des Nutzers in einer virtuellen Umgebung bedingen und beeinflussen” [Regenbrecht, 2000](S.31).*

**Definition 5** (Präsenz). *Ein Wahrnehmender ist präsent in einer virtuellen Realität, wenn er das Gefühl hat, sich tatsächlich in dieser Welt zu befinden [Schuemie et al., 2001].*

Definitionen 4 und 5 liefern noch keine Kriterien (Anhaltspunkte), an denen der Grad der Präsenz gemessen werden kann. [Sheridan, 1994] nannte zusammenfassend folgende:

1. Die **Qualität und Quantität** von visuellem, auditivem und haptischem Feedback
2. Die Möglichkeit, die Sensoren und den **“point-of-view”** in einer virtuellen Welt zu bewegen
3. Die Möglichkeit, mit der Umgebung so einfach wie mit der echten Welt zu **interagieren**

Punkt 2 konnte inzwischen erfolgreich umgesetzt werden, denn VR-Setups sind mit einem Tracking System ausgestattet, das es erlaubt, zu jedem Zeitpunkt die Nutzerposition im Raum zu bestimmen. Wird dazu eine getrackte Brille genutzt, kann die Kopfposition bestimmt und die Perspektive in Echtzeit angepasst werden. In Bezug auf Punkt 3 ist anzumerken, dass es bereits viele verschiedene Interaktions- und Navigationsverfahren für virtuelle Welten gibt. So ist immer mit Rücksicht auf das aktuelle Projekt und die Voraussetzungen zu entscheiden, welches das Mittel der Wahl ist. [Renner et al., 2010] geben einen Überblick über einige verschiedene Methoden mit einem Vergleich der Vor- und Nachteile. In der AG WBS wurden viele innovative Interaktionskonzepte realisiert, wie zum Beispiel die Sprach- und Gesteneingaben [Latoschik, 2002]. Von aktuellem Interesse ist immer noch Punkt 1, da noch keine umfassenden multisensorischen Stimuli generiert werden können. Im weiteren Verlauf wird dieser Aspekt näher besprochen.

### **Der AIP-Würfel**

1992 veröffentlichte David Zeltzer ein dreidimensionales Klassifikationsschema, um die Qualität virtueller Realitäten messen zu können. Das von ihm als Taxonomie bezeichnete Schema beschrieb er in Form des AIP-Würfels (siehe Abbildung 2.5). Seine drei Achsen Autonomie, Interaktion und Präsenz sollen im Folgenden definiert werden.

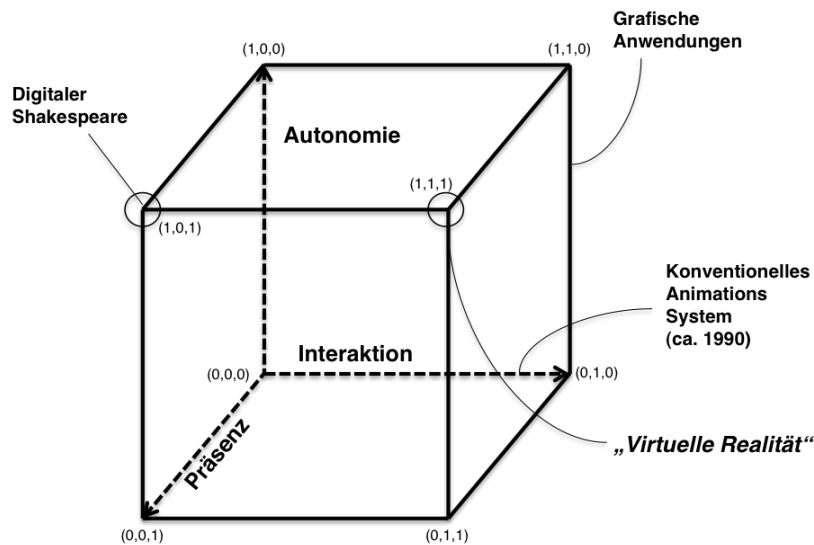


Abbildung 2.5.: Der AIP-Würfel als Klassifikationsschema für virtuelle Welten, mit den drei Achsen Autonomie, Interaktion und Präsenz (nachgezeichnet aus [Zeltzer, 1992]).

**Definition 6** (Autonomie). “[...] ist ein qualitatives Maß der Fähigkeit eines Computermodells, zu handeln und auf Events und Stimuli zu reagieren. Die Skala reicht von 0 für ein passives geometrisches Modell bis 1 für einen hochentwickelten, physikalisch basierten virtuellen Agenten.”<sup>1</sup>

**Definition 7** (Interaktion). “[...] bedeutet in diesem Kontext den Grad der Zugriffsmöglichkeiten auf Modellparameter zur Laufzeit. Dabei kann zwischen 0 für keinerlei Zugriff und 1 für umfangreichen Zugriff auf alle Parameter skaliert werden.”<sup>2</sup>

**Definition 8** (Präsenz). “[...] der Grad, zu dem Input- und Output-Kanäle der Maschine und des Menschen zusammenpassen.”<sup>3</sup> Somit ergibt sich “[...] pauschal ein grobes Maß der Anzahl und Glaubwürdigkeit von vorhandenem Sensor In- und Output.”<sup>4</sup>

Betrachtet man die bereits eingezeichneten Punkte, kann man den von Zeltzer als “digitaler Shakespeare” bezeichneten Punkt (1,0,1) mit heutigen 3D- oder sogar 4D-Kinoerfahrungen vergleichen. Es werden möglichst viele Sinne angesprochen insbesondere durch realistische stereoskopische Bilder und Surroundsound-Effekte. Außerdem

<sup>1</sup>Übersetzt aus dem Englischen ([Zeltzer, 1992] Seite 127)

<sup>2</sup>Übersetzt aus dem Englischen ([Zeltzer, 1992] Seite 127)

<sup>3</sup>Übersetzt aus dem Englischen ([Zeltzer, 1992] Seite 129)

<sup>4</sup>Übersetzt aus dem Englischen ([Zeltzer, 1992] Seite 128)

sind die dargestellten Charaktere mit viel Tiefe umgesetzt und handeln in der Filmwelt autonom. Der Besucher hat jedoch keinerlei Möglichkeit, in das Geschehen einzugreifen, sondern ist lediglich passiver Zuschauer.

Der AIP-Würfel von David Zeltzer bietet auch zwanzig Jahre später noch eine Grundlage zur Betrachtung unterschiedlicher VR-Projekte. Dieser Würfel soll hier nicht nur dem Vergleich verschiedener Anwendungen dienen, vielmehr kann er auch als Anregung zur Verbesserung von virtuellen Welten verstanden werden. Wird zu einem Zeitpunkt der Punkt (1,1,1) erreicht, kann man sich gut das visionäre Holodeck aus Star Trek vorstellen – die perfekte virtuelle Realität ist geschaffen. Um dieser Vision möglichst nahe zu kommen, sollten auf allen drei Achsen Fortschritte erzielt werden.

### 2.1.2. Messverfahren für Präsenz

Da es sich bei Präsenz um ein subjektives Empfinden handelt, ist es nicht möglich, ein Messverfahren zu entwickeln, das exakt angibt, wie präsent jemand in einer virtuellen Welt ist. Für die quantitative Erhebung von Daten werden drei **Gütekriterien** festgelegt, die auch zu den Anforderungen von Teilziel 3 gehören (vgl. Abschnitt 1.2). Ein geeignetes Verfahren sollte möglichst alle Kriterien erfüllen, die in der psychologischen Methodenlehre an Testwerkzeuge gestellt werden. Sie können als Grundlage für geeignete Testverfahren betrachtet werden (siehe z.B. [Bordens und Abbott, 2002]).

- **Objektivität** verlangt nach Testleiter-unabhängigen Ergebnissen. Dies bedeutet, dass zwei verschiedene Personen die gleichen Daten sammeln und diese Daten auf gleiche Weise auswerten und interpretieren müssen.
- **Reliabilität** bezeichnet die formale Zuverlässigkeit. Die Ergebnisse können von Versuch zu Versuch reproduziert werden. Unter gleichen Messbedingungen werden die gleichen Ergebnisse produziert. Der Zufallsfehler ist minimal, sowohl bei dem gleichen wie auch bei einem anderen Versuchsteilnehmer.
- **Validität** bezeichnet die Aussagekraft der Ergebnisse, also die Frage, ob auch wirklich das gemessen wird, was gemessen werden soll.

Es gilt dabei der wichtige Grundsatz: *Ohne Objektivität keine Reliabilität, ohne Reliabilität keine Validität*. Alle drei Kriterien lassen sich noch in weitere Unterpunkte aufteilen, um eine bessere Beurteilung zu ermöglichen. Aber auch weitere Faktoren müssen bei

dem Entwurf geeigneter Testverfahren berücksichtigt werden. Dazu gehört beispielsweise die ökonomische Handhabung in Durchführung und Auswertung sowie die Zumutbarkeit für die Testpersonen (nachzulesen z.B. in [Lienert und Raatz, 1998]).

In Bezug auf die Präsenzmessung lässt sich feststellen, dass es kaum möglich sein wird, ein einzelnes, umfassendes Testwerkzeug zu entwickeln. Ein Grund dafür ist die fehlende eindeutige Definition, die festlegen würde, welche Faktoren zu testen sind. Im Laufe der letzten Jahre wurden verschiedene Verfahren entwickelt, mit denen versucht wird, dieses subjektive Empfinden festzustellen und vergleichbar zu machen. Bei der Messung werden zwei Herangehensweisen unterschieden:

1. **Subjektiv** wahrgenommene Präsenz vom Besucher selbst bewertet
2. **Objektiv** vom Versuchsleiter gemessene Präsenz des Besuchers

Jede Kategorie bringt Vor- und Nachteile, aber auch bestimmte Bedingungen mit sich. Die “International Society for Presence Research (ISPR)” stellt auf ihrer Webseite ein Repertoire von Testwerkzeugen bereit [ISPR, 2013]. Im Folgenden werden beide Kategorien kurz vorgestellt und die bekanntesten Verfahren daraus erläutert.

### Subjektive Messverfahren

Auf Grund ihrer Subjektivität sind die Eindrücke der Besucher virtueller Welten problematisch. Eine Vergleichbarkeit ist nur in geringem Maße gegeben. Fragebögen haben sich als akzeptables Mittel etabliert, um subjektive Testantworten vergleichbar zu machen. Meistens werden sie nach dem Versuch beantwortet, es gibt aber auch die Möglichkeit, direkt während des Experiments wichtige Punkte abzufragen [Ijsselsteijn et al., 1998].

Bei der Entwicklung eines Fragebogens besteht die Herausforderung darin, geeignete Fragen zu entwickeln, die Skalen anzupassen und begleitende Effekte herauszufiltern. In Bezug auf die geforderten Gütekriterien (Objektivität, Reliabilität, Validität), erfüllen Fragebögen die Anforderung der *Objektivität* sehr gut. Es gibt allenfalls einen minimalen persönlichen Kontakt zwischen Versuchsleiter und Proband, während der Fragebogen ausgefüllt wird. Gut durchdachte und getestete Fragebögen sind zumeist auch *reliabel*. Die *Validität* kann nicht exakt gemessen werden, sondern wird von einer Expertengruppe geschätzt. In der Praxis haben sich zwei Fragebögen zur Präsenzmessung etabliert: Der **Presence Questionnaire** (PQ) von Witmer und Singer [Witmer und Singer, 1998] und der **Slater Usoh Steed Questionnaire** (SUS) [Usoh et al., 2000].

1998 stellten Witmer und Singer einen Fragebogen vor, mit dem sie Präsenz in virtuellen Welten gemessen haben. Zusätzlich zu ihrem Präsenz-Fragebogen (PQ) entwarfen sie den **Immersion Tendency Questionnaire** (ITQ). Der ITQ soll Auskunft darüber geben, wie schnell Personen dazu tendieren, Präsenz zu erfahren. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass es große Unterschiede gibt, wie leicht sich jemand auf eine virtuelle Welt einlässt. Witmer und Singer stellten die Hypothese auf, dass jemand, der sich schnell präsent fühlt und nicht leicht ablenken lässt, stärker in virtuelle Welten eintauchen kann. In dem ITQ werden Fragen zu drei wesentlichen Bereichen gestellt:

1. **Involvement**<sup>2</sup>: Die Tendenz, in Aktivitäten absorbiert zu werden
2. **Fokus**: Die Tendenz, den Fokus auf der aktuellen Aktivität zu belassen
3. **Games**: Die Tendenz, Computerspiele zu spielen

Die Annahme ist, dass ein erhöhter Fokus auf die virtuelle Welt zu einem stärkeren Involvement führt. Dieses resultiert in einer erhöhten Präsenz [Witmer und Singer, 1998]. Involvement befasst sich hauptsächlich mit Tätigkeiten, die aktiv versuchen, den Betrachter in eine fremde Welt zu ziehen (z.B.: lesen, fernsehen). Beispielsweise wird gefragt, ob die Versuchsperson jemals so sehr in einen Film vertieft war, dass ihr die Dinge, die um sie herum passierten, nicht mehr bewusst waren. In dem Bereich Fokus werden Fragen darüber gestellt, wie schwer sich eine Person von ihrer aktuellen Tätigkeit lösen kann. Dazu gehören Fragen, ob man während des Lesens eines Buches schnell die Zeit vergisst oder ob man sich so sehr in Tagträume vertiefen kann, dass man die Dinge um sich herum vergisst. Den Fragen in der Kategorie Games liegt die Annahme zu Grunde, dass Personen mit einer hohen Immersionstendenz in ihrer Freizeit häufig Computerspiele spielen. Der ursprünglich vorgestellte ITQ umfasste 29 Fragen – von denen bei 23 eine Korrelation zur Präsenz festgestellt wurde. Heute wird häufig eine Version mit 12 Kernfragen eingesetzt. Die berechneten Korrelationen von ITQ zur später gemessenen Präsenz bestätigen die Annahme, dass es starke interpersonelle Schwankungen darin gibt, wie viel Präsenz jemand überhaupt erfährt.

Der vorgestellte Präsenz-Fragebogen (PQ) umfasst 32 Fragen. Darin werden verschiedene Konzepte abgefragt, von denen angenommen wird, dass sie mit der wahrgenommenen Präsenz in Verbindung stehen (vgl. [Sheridan, 1992a], [Held und Durlach, 1991]).

---

<sup>2</sup>deutsch: Beteiligung

In einigen Untersuchungen konnten Witmer und Singer feststellen, dass viele der Fragen sowohl mit dem zugehörigen Konzept korrelieren wie auch mit dem Gesamtergebnis der Präsenz. Kurz nach dem Erscheinen des Artikels veröffentlichte Mel Slater eine Stellungnahme, in der er diesen Fragebogen stark kritisierte [Slater, 1999]. Er argumentiert dabei, dass der vorgestellte Fragebogen nicht den psychologischen Zustand der Präsenz misst, sondern die Reaktion auf Systemeigenschaften. Den ITQ hingegen, erkennt er als hilfreich an und nutzt ihn seitdem auch in seinen eigenen Arbeiten. Etwas später stellte er einen eigenen Fragebogen vor (SUS), der über mehrere Jahre hinweg entwickelt und evaluiert wurde [Usoh et al., 2000]. Der SUS-Fragebogen richtet sich nach folgenden drei Themengebieten: (1) Das Gefühl, in der virtuellen Welt anwesend gewesen zu sein, (2) das Ausmaß, zu dem die VR die dominante Realität wurde und (3) wie sehr die VR als besuchter Ort in Erinnerung bleibt. Auch dieser Fragebogen hat viel Akzeptanz gefunden und seine Validität wurde in vielen Studien bekräftigt. Es kann keine abschließende Empfehlung für einen bestimmten Fragebogen gegeben werden, zumal auf den Webseiten der ISPR weitere 27 Fragebögen verlinkt sind.

Weitere subjektive Verfahren beinhalten Interviews, Thinking aloud<sup>3</sup> oder die qualitative Analyse von Videomaterial. All diese Verfahren sind weniger zuverlässig als Fragebögen und teilweise deutlich zeitintensiver in der Durchführung. Deswegen werden sie meist nur als zusätzliche Datenquelle eingesetzt, um die Ergebnisse der Fragebögen zu unterstützen und in manchen Fällen die Interpretation der Resultate zu vereinfachen. Eine andere Herangehensweise wurde von [Slater und Steed, 2000] vorgestellt. Dabei wird die Versuchsperson während des Experiments darum gebeten, dem Versuchsleiter mitzuteilen, wenn sie selbst aktiv einen Übergang von der virtuellen Welt zurück in die reale Welt bemerkt. Die Anzahl dieser sogenannten **Transitionen** kann ein wichtiges Indiz für die erlebte Präsenz sein. Je seltener die VP eine Transition meldet und je länger die Intervalle in der virtuellen Welt sind, desto präsenter ist sie. Es konnte eine signifikante Korrelation zwischen den Transitionen und der Präsenz aus Fragebögen gefunden werden.

Subjektive Eindrücke bleiben schwer vergleichbar, aber durch eine Kombination von ITQ mit einem geeigneten Präsenzfragebogen und einem Testwerkzeug zur Laufzeit können recht zuverlässige Daten gesammelt werden. Der zusätzliche Einsatz von objektiven Methoden wird dennoch empfohlen, wie im Folgenden erläutert wird.

---

<sup>3</sup>die Versuchsperson erzählt während der gesamten Versuchsdauer, wie ihr aktueller Zustand ist

## Objektive Messverfahren

Es ist bisher nicht gelungen, ein Testwerkzeug zu entwickeln, welches allen Anforderungen genügt, jedoch konnten einige objektive Faktoren extrahiert werden, die deutliche Hinweise auf die empfundene Präsenz geben. Sheridan schrieb bereits 1992, “dass es sich bei Telepräsenz (oder virtueller Präsenz) um eine subjektive Empfindung handelt [...], welche nicht durch objektive, physiologische Definitionen und Messverfahren zugänglich ist” [Sheridan, 1992b]<sup>4</sup>. Er hält es somit für unmöglich, ein einziges objektives Testwerkzeug zu finden. Die objektiven Verfahren können nur in angemessenem Kontext Anhaltspunkte für das subjektive Empfinden von Präsenz geben. Dazu gehören insbesondere Daten, die während des Versuchs gesammelt werden können, darunter Körperreaktionen wie Puls, Hautleitfähigkeit und Temperatur, aber auch Task-Performance und das Verhalten der Testperson (s.u.).

**Körperreaktionen** können nur schwer von der Versuchsperson beeinflusst werden. Die zugrunde liegende Hypothese lautet: Wenn der Proband auf die virtuelle Umgebung ähnlich oder genauso reagiert wie auf eine vergleichbare reale Umgebung, dann ist er präsent. Gemessen wird insbesondere die **Herzfrequenz**, denn eine Änderung der Anzahl an Herzschlägen pro Minute lässt Rückschlüsse auf den Grad der Spannung bzw. Entspannung der Versuchsperson zu. Als Folge eines schnellen Herzschlags kann eine Verminderung der **Temperatur** an den Extremitäten gemessen werden. Auslöser für eine solche Änderung sind häufig Stress oder Angst, wodurch auch die **Hautleitfähigkeit** steigt. Ist die Reaktion stark genug, bildet sich Schweiß an der Handinnenfläche. Es gibt verschiedene Geräte, die diese Daten, über Sensoren an den Fingern der nicht dominanten Hand, aufnehmen.

Eine Kosten-Nutzen-Analyse muss im Einzelfall erfolgen, um auszuschließen, dass die zusätzlichen Sensoren eine Präsenz in der virtuellen Welt eher verhindern als sie zu messen. Das kann beispielsweise bei sehr bewegungsreichen Anwendungen der Fall sein, da Bewegungen erfahrungsgemäß etwas gehemmter erfolgen, wenn Besucher stark verkabelt sind. Ein weiterer Nachteil ist, dass die **Reaktion auf Stress** nur durch einen Vergleich mit der Reaktion auf eine ähnliche reale Umgebung aussagekräftig wird. Somit haben sich bestimmte stressreiche Szenarien etabliert, insbesondere ein “Virtual Pit” – ein virtueller Abgrund [Slater et al., 1995]. Einen guten Einblick in die Entwicklung der

---

<sup>4</sup>(Seite 209), aus dem Englischen übersetzt

## 2. GRUNDLAGEN DER WAHRNEHMUNG UND GENERIERUNG VIRTUELLER WELTEN

---

virtuellen Abgründe findet man z.B. in [Blasovich und Bailenson, 2011]. Abbildung 2.6 zeigt eine typische virtuelle Testumgebung. Charakteristisch ist dabei die Unterteilung in zwei Räume. Auf der linken Seite befindet sich der sogenannte Trainingsraum, in dem vorab alle wichtigen Interaktions- und Navigationsverfahren getestet werden können. Erst nachdem eine Tür geöffnet wird, ist der virtuelle Abgrund zu sehen. Dieses Überraschungsmoment lässt sich in den physiologischen Daten wiedererkennen.



Abbildung 2.6.: Ein typischer Versuchsaufbau für Studien mit virtuellen Abgründen, bestehend aus einem Trainingsraum (links) und einem Raum mit Abgrund (rechts), wie er von [Meehan et al., 2002] eingesetzt wurde.

Weitere mögliche physiologische Messungen besitzen nach aktuellen Erkenntnissen keine stärkere Aussagekraft, als die Daten von Puls und Hautleitfähigkeit (vgl. [ISPR, 2013]). Da es sich außerdem um aufwendigere und auch einschränkendere Methoden handelt, sind sie im Kontext virtueller Welten meistens nicht sinnvoll einsetzbar. Zu diesen Verfahren zählen beispielsweise:

- **EEG** (Elektroenzephalografie) – Messung der elektrischen Gehirnaktivität
- **fMRI** (funktionelle Magnetresonanztomografie) – Darstellung der aktiven Hirnareale
- **EMG** (Elektromyographie) – Messung der elektrischen Muskelaktivität



**Task-Performance** (die Leistung bei einer bestimmten Aufgabe) steht ebenfalls in Verbindung mit der erlebten Präsenz. Unter der Voraussetzung, dass zwei Versuchspersonen den gleichen Kenntnisstand zur virtuellen Umgebung haben, wird diejenige, die präsenter in der virtuellen Welt ist, ein besseres Ergebnis bei einer ihr gestellten Aufgabe erzielen. Natürlich muss eine angemessene Trainingszeit gewährleistet werden, sodass die Aufgabe theoretisch gleich gut erfüllt werden kann. Gemessen werden kann dabei die Zeit, die benötigt wird, um die Aufgabe zu erfüllen, oder auch die Anzahl der Fehler. In jedem Fall sollte die gestellte Aufgabe wohl überlegt und in einer Vorstudie überprüft werden, um aussagekräftig zu sein. Darin liegt auch der große Nachteil solcher Methoden – sie sind untereinander nur schwer vergleichbar. Innerhalb einer Gruppe mit gleicher Aufgabe können aber gute Ergebnisse erlangt werden.

**Das Verhalten** von Besuchern auf die virtuelle Welt kann während des Versuchs beobachtet und im Anschluss ausgewertet werden. Dabei gilt die gleiche Grundannahme wie bei den Körperreaktionen: Je präsenter jemand in einer virtuellen Welt ist, umso mehr gleichen seine Reaktionen auf virtuelle Stimuli denen von vergleichbaren Stimuli in der realen Welt: Weicht jemand aus, wenn ein virtueller Ball auf ihn zufliegt? Macht er einen großen Schritt rückwärts, sobald ein Abgrund vor ihm auftaucht? Bewegt er sich mit dem Auto in einer Fahrsimulation? Je stärker diese Reaktionen sind, umso höher ist die Präsenz – die in diesem Fall als “behavioral presence” bezeichnet wird. Das Problem bei dieser Methode ist vor allem die Messung, da sie entweder auf einer Einschätzung des Versuchsleiters oder einer anschließenden Videoauswertung beruht. Dies beinhaltet Fehlerquellen. Die Videoauswertung ist darüber hinaus sehr zeitaufwendig.

Die ISPR gibt auf ihrer Webseite insgesamt 16 objektive Methoden zur Präsenzmessung an [ISPR, 2013]. Wegen der bereits erwähnten Nachteile sollten diese Verfahren nur als ergänzende Datenquelle genutzt werden.

### 2.1.3. Wissensbasen für virtuelle Welten

Die Entwicklung virtueller Welten ist eine zeitintensive Aufgabe. Problematisch ist außerdem, dass viele Forschungsprojekte jeweils eigene Hardwarevoraussetzungen haben und virtuelle Welten maßgeschneidert für diese entwickeln. Eine Übertragbarkeit in andere Labore ist dadurch meistens nicht möglich. Hinzu kommen eine Vielzahl kommerzi-

eller Softwareframeworks sowie arbeitsgruppenspezifische Eigenentwicklungen. All diese Faktoren sorgen dafür, dass es oft keine Möglichkeit gibt, untereinander Komponenten auszutauschen und weiter zu verwenden. Seit einiger Zeit wird versucht, dem entgegenzuwirken, zum Beispiel durch die Entwicklung von weiterverwendbarer Komponenten (vgl. z.B. [Brunnett et al., 2008], [Latoschik und Tramberend, 2010]). Auch die vorliegende Dissertation hat als Ziel, dass der Entwicklungsaufwand für neue virtuelle Welten nicht weiter erhöht werden darf (vgl. Abschnitt 1.2).

Zur effizienten Softwareentwicklung sind einige Anforderungen definiert worden. Ein sehr bekanntes frühes Modell ist das sogenannte FURPS-Modell [Grady und Caswell, 1987], das in vielen weiteren Arbeiten ergänzt und konkretisiert wurde (insbesondere: [Grady, 1992]). Die Norm ISO/IEC 9126 [ISO/IEC, 2001] stellt sechs Kriterien auf, um die Softwarequalität sicher zu stellen:

1. **Funktionalität:** Die Software erfüllt die geforderten Aufgaben und festgelegten Eigenschaften.
2. **Zuverlässigkeit:** Die Funktionalität bleibt unter festgelegten Bedingungen und für einen festen Zeitraum gewährleistet.
3. **Benutzbarkeit:** Die entwickelte Software ist praktikabel und wird von der Zielgruppe angenommen.
4. **Effizienz:** Der Nutzen der entwickelten Software ist höher zu bewerten als die Kosten der benötigten Ressourcen (Rechenzeit, Strom, ...).
5. **Änderbarkeit:** (auch Wartbarkeit) Es können leicht Anpassungen vorgenommen werden, der Aufwand zur Instandhaltung ist gering.
6. **Übertragbarkeit:** Die entwickelte Software kann leicht in einer anderen Umgebung eingesetzt werden, auf Hard- und Softwareebene.

Ein Ansatz, weiteres Wissen in virtuellen Welten zu speichern, ist die Anreicherung von Objekten mit semantischen Informationen. Diese Wissensrepräsentationen können genutzt werden, um die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu vereinfachen [Wachsmuth et al., 1995]. Im Allgemeinen stellen semantisch angereicherte Objekte eine effiziente Möglichkeit zur Integration weiterer Eigenschaften in virtuellen Welten dar und werden oft als Intelligente Virtuelle Umgebungen (IVEs<sup>5</sup>) bezeichnet [Luck und

---

<sup>5</sup>aus dem Englischen: Intelligent Virtual Environments

Aylett, 2000]. Virtuelle Welten werden meist durch einen Szenengraph (eine hierarchische Struktur mit allen Objekten) repräsentiert. [Luck und Aylett, 2000] schlagen vor, diese Struktur zu nutzen, um weitere Informationen abzuspeichern. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen *Objektwissen* und *Umgebungswissen* hilfreich. Informationen, zum Beispiel über die Schwerkraft, die alle Objekte benötigen, sollen zentral in der Welt verankert sein, wohingegen Objekte eigenes spezifisches Wissen direkt speichern können. Außerdem soll die Wissensbeschreibung getrennt von der grafischen Darstellung gespeichert werden. Dafür sollte idealerweise eine eigene Beschreibungssprache geschaffen werden, um diese Wissensbasis portabel und wiederverwendbar zu machen. Dies geschah zum Beispiel umfassend in dem Projekt CODY (“Concept Dynamics”) mit der entwickelten Beschreibungssprache COAR [Jung und Wachsmuth, 1995]. In Abschnitt 3.2 werden diese und weitere verwandte Arbeiten zum Thema näher betrachtet.

### 2.2. Wahrnehmung und Generierung multisensorischer Stimuli

Damit sich ein Besucher in einer virtuellen Welt anwesend fühlt, bedienen sich VR-Anwendungen einer großen Bandbreite von Methoden. Wie in der realen Welt sollten die wahrgenommenen Reize möglichst umfassend sein und dürfen sich vor allem nicht widersprechen. Es ist daher hilfreich, den Vorgang der menschlichen Wahrnehmung genauer zu betrachten. Wenn bekannt ist, wie der Mensch seine Umwelt durch die Sinne wahrnimmt und welche Mechanismen dabei eine besondere Rolle spielen, kann eine fast real erscheinende virtuelle Welt entwickelt werden.

Informationen verschiedener Energieformen wie Licht, Schall, Hitze oder auch Moleküle aus der Luft werden von spezialisierten Zellen aufgenommen. Sensorische Rezeptorzellen können diese Energie detektieren und in Aktionspotentiale umwandeln. Beim Menschen (und allen Wirbeltieren) werden diese Aktionspotentiale zum Zwischenhirn (*Thalamus*) weitergeleitet und von dort aus an die Großhirnrinde (*cerebraler Cortex*) übergeben. Der Thalamus übernimmt dabei bereits eine Filterfunktion und lässt nur die zu dem jeweiligen Zeitpunkt wichtigen Informationen durch. Ansonsten wären wir einer ständigen Reizüberflutung ausgesetzt. Je nach Informationstyp gibt es spezialisierte Gehirnregionen, die die Informationen weiter verarbeiten. In der Wahrnehmungsphysiologie erfolgt eine Unterteilung in **Empfindung** und **Wahrnehmung**. Der beschriebene Prozess stellt dabei die Empfindung dar, während Wahrnehmung in den jeweiligen Gehirnregionen entsteht, in denen ein Kontext hergestellt wird, auf Erinnerungen zurückgegriffen wird und die wahrgenommenen Informationen einen “Sinn” bekommen.

Klassischerweise wird die Wahrnehmung des Menschen in fünf Hauptsinne unterteilt: Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Tasten. Aus heutiger Sicht kann eine feinere Unterscheidung getroffen werden, indem zusätzlich die trigeminale Wahrnehmung, die Viszerozeption und die vestibuläre Wahrnehmung abgegrenzt werden. Abbildung 2.7 gibt einen Überblick. Es handelt sich um allgemeine Erkenntnisse der Wahrnehmungsphysiologie und Biologie, die zum Beispiel in [Campbell, 2009] oder [Schandry, 2011] vertieft werden können. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Sinne und ihre Bedeutung für multisensorische virtuelle Welten dargestellt.

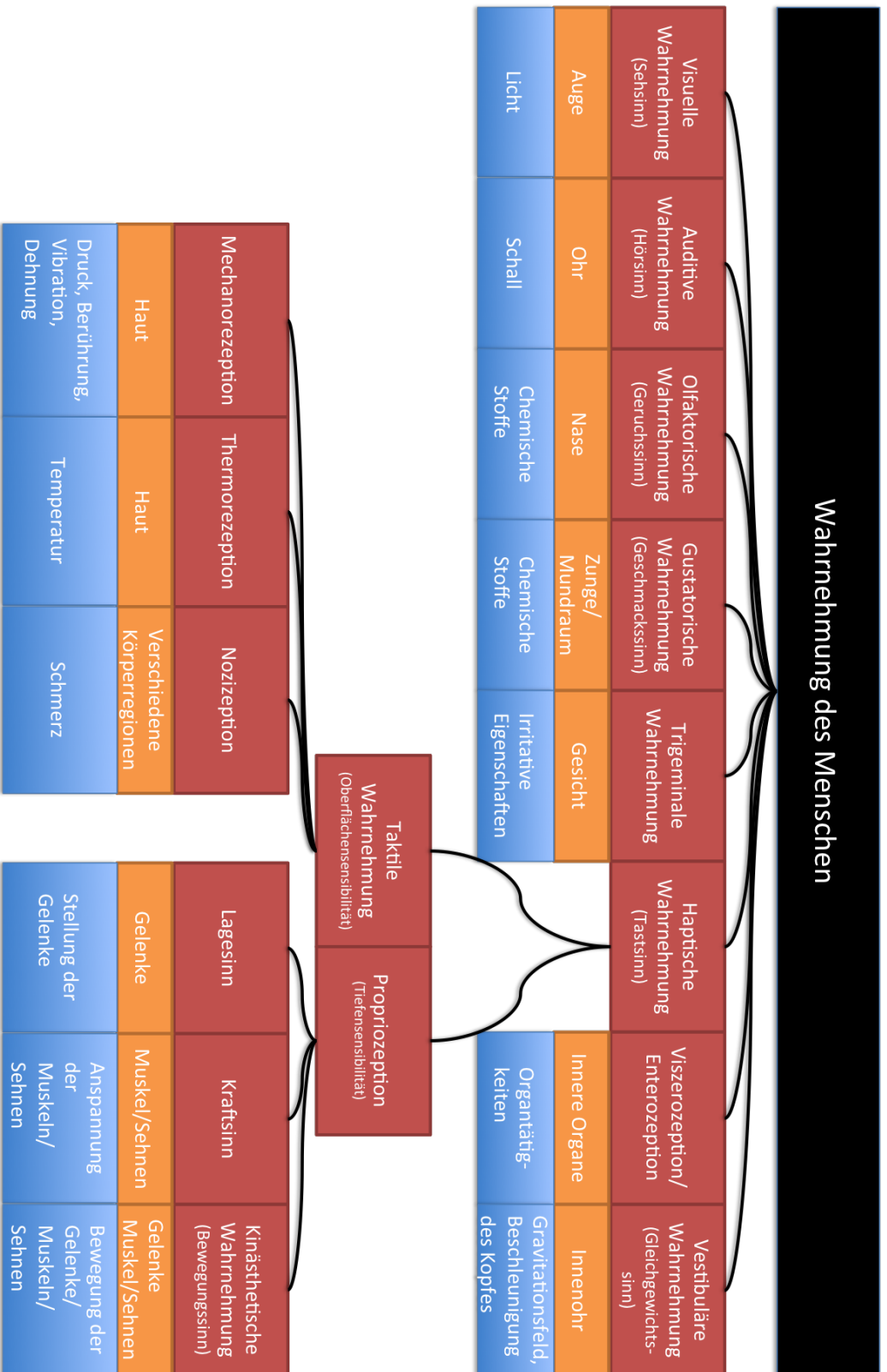


Abbildung 2.7.: Einteilung des menschlichen Wahrnehmungsapparats in acht Sinne (rot), die Position der Rezeptoren (orange) und die wahrnehmbaren Reize (blau) (nach [Roemert, 2011]).

### 2.2.1. Visuelle Stimuli

Als visuelle Wahrnehmung wird die Aufnahme von Reizen über das Auge bezeichnet, indem Licht an den Rezeptoren aufgenommen und im Gehirn verarbeitet wird. Dieser Vorgang findet im sogenannten visuellen System statt, welches das Auge (mit Netzhaut), den Sehnerv und bestimmte Hirnregionen umfasst. Dem Menschen ist es dabei möglich, Licht in einem Spektrum von 380 bis 780nm zu sehen. Höher- oder niederfrequente Bereiche (zum Beispiel Infrarot oder Ultraviolett) kann das menschliche Auge nicht mehr wahrnehmen.

Bei nicht sehbehinderten Menschen ist der visuelle Reiz der Hauptsinn, die Rezeptoren (Stäbchen und Zapfen) machen 70% der menschlichen Sinneszellen aus. Die visuellen Informationen sind demzufolge besonders entscheidend für die Wahrnehmung unserer Umgebung.

#### Bedeutung in der virtuellen Realität

VR-Installationen haben entsprechend meist eine visuelle Ausgabe. Eine der wenigen Ausnahmen ist das Projekt AudioDoom, bei dem eine virtuelle Welt allein über akustische Ausgaben generiert wird [Sánchez und Lumbreras, 1999].

Es können zwei unterschiedliche Ansätze zur visuellen Ausgabe unterschieden werden. Dabei handelt es sich um lokale Systeme mit kleinen Displays, welche direkt an dem Menschen angebracht werden, und globale Installationen mit großen Projektionsflächen. Häufig genutzt werden das Head-mounted Display (**HMD**) [Sutherland, 1968] und ein Cave Automatic Virtual Environment (**CAVE**) [Cruz-Neira et al., 1992]. Mit einem HMD werden über zwei Displays die generierten Bilder direkt vor den Augen abgespielt. Dabei gibt es im Wesentlichen zwei Probleme: Zum einen sind die Geräte häufig sehr schwer und somit nur bedingt für längere Einsätze geeignet, zum anderen haben sie ein zu geringes Gesichtsfeld. Der Mensch kann binokular ca. 180° sehen (90° pro Auge). HMDs haben meist nur ein Gesichtsfeld zwischen 30° und 50°. So lassen sie die Grenzen der beiden Bildschirme deutlich erkennen. Eine aktuelle Neuentwicklung, das *Oculus Rift*, kann erstmals ein 180°-Gesichtsfeld darstellen [Oculus, 2012]. Mit diesem neuen Gerät werden die genannten Probleme erstmals minimiert, sodass sich ein breiteres Einsatzgebiet eröffnet. Eine CAVE hingegen ist eine globale Installation, bestehend aus einem (Teil-)Würfel, dessen Wände Projektionsflächen sind. Somit entsteht ein Raum, der von mehreren Personen betreten werden kann. Die stereoskopische Darstellung erfolgt meist

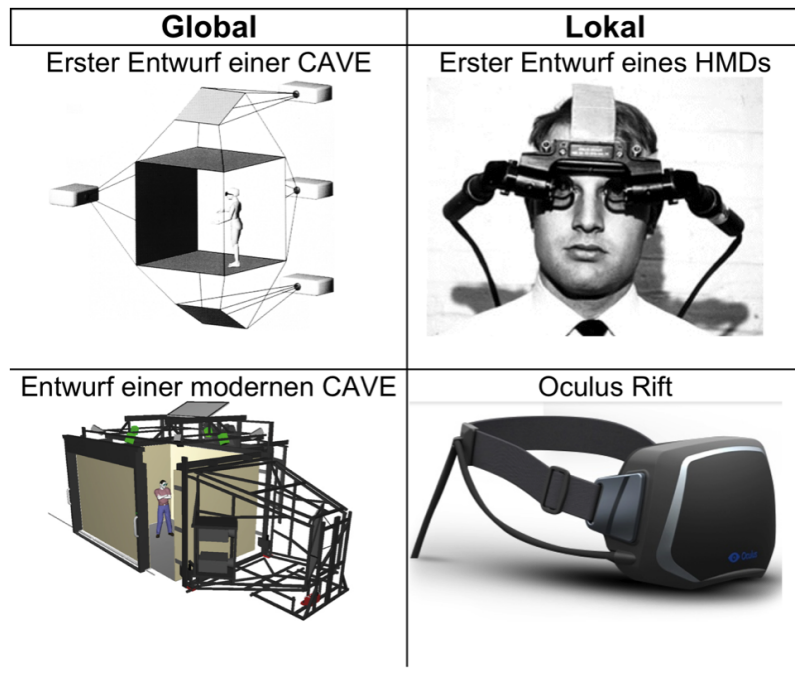


Abbildung 2.8.: Unterschiedliche Geräte zur Darstellung visueller virtueller Welten: Auf der linken Seite oben ist der erste Entwurf einer CAVE [Cruz-Neira et al., 1992] zu sehen, darunter eine neuere Umsetzung an der RWTH Aachen [Lentz et al., 2006]. Auf der rechten Seite ist oben ein HMD wie von [Sutherland, 1968] vorgeschlagen abgebildet und darunter das Oculus Rift [Oculus, 2012].

über Polarisationsfilter – der Besucher muss eine entsprechende Brille tragen. Zur Bewegungserfassung, Interaktion und Navigation müssen geeignete Methoden gewählt werden, die häufig mit weiteren Geräten verbunden sind. Ein weiterer Vorteil einer CAVE liegt darin, dass der Besucher seinen eigenen Körper sehen kann und somit direkt (nicht über einen Avatar) mit der virtuellen Welt interagieren kann. Abbildung 2.8 zeigt die ersten Entwürfe und jeweils eine aktuelle Version.

Um dem Besucher möglichst realistische virtuelle Welten zu präsentieren, wurden viele Methoden zur Berechnung der Bilder entwickelt. Da virtuelle Welten interaktiv sind und in Echtzeit manipuliert werden können, müssen hinreichend viele Bilder pro Sekunde generiert werden. Die Berechnung fotorealistischer Bilder ist sehr rechenintensiv und insbesondere für virtuelle Welten meist nicht praktikabel. Es werden Approximationen eingesetzt, mit denen Rechenzeit eingespart wird. Die daraus resultierenden Bilder sind aber nicht als fotorealistisch zu bezeichnen. Eine häufig eingesetzte Approximati-

on ist das **Phong Beleuchtungsmodell**, bei dem als Vereinfachung das Licht in drei Komponenten aufgeteilt wird [Phong, 1975]:

1. **Ambientes Licht**  $I_{ambient}$  ist unabhängig von der Blickrichtung des Betrachters und hat keine Richtung und somit keinen Eintrittswinkel an Objekten. Dadurch kann eine weit entfernte Lichtquelle (Sonne) simuliert werden.
2. **Diffuses Licht**  $I_{diffuse}$  ist unabhängig von der Blickrichtung des Betrachters, aber abhängig vom Eintrittswinkel des Lichtstrahls. Dieses Licht wird nach dem Lambertschen Kosinusetz abgestrahlt.
3. **Spiegelndes Licht**  $I_{specular}$  ist sowohl von der Blickrichtung wie auch vom Eintrittswinkel abhängig.

Um unterschiedliche Materialien darzustellen, bekommen alle Objekte eine Materialkonstante, in der genau festgelegt werden kann, wie sie die drei unterschiedlichen Lichttypen reflektieren. Die Gesamtbeleuchtung  $I$  errechnet sich dann nach Formel 2.1:

$$I = I_{ambient} + I_{diffuse} + I_{specular} \quad (2.1)$$

### 2.2.2. Auditive Stimuli

Die auditive Wahrnehmung des Menschen findet hauptsächlich über das Ohr statt. Nur Geräusche im sehr niederfrequenten Bereich können auch über die haptische Wahrnehmung (siehe Abschnitt 2.2.3) aufgenommen werden. Die Rezeptoren im Ohr nehmen Schall zwischen 20 Hertz und 20 kHz wahr. Diese Werte sind abhängig von der Lautstärke der Quelle und dem Alter des Hörers. Der Hörvorgang beruht auf der Umwandlung von Schallwellen in Nervenimpulse.

Im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung können akustische Signale sehr fein unterschieden werden. Dies gilt auch für in sehr kurzen Abständen freigesetzte Signale. Es ist zudem möglich, die Richtung einer Schallquelle zu bestimmen. Dieser Vorgang wird in der Akustik **Lokalisation** genannt. Dabei spielen verschiedene Mechanismen eine Rolle. Die *Laufzeitdifferenz* beschreibt das Zeitintervall (im Millisekundenbereich), in dem die Laute an den beiden Ohren wahrgenommen werden. Ist eine Geräuschquelle direkt rechts von einem Menschen, wird das rechte Ohr die Geräusche eher wahrnehmen als das



linke Ohr. Da sich Schall mit ca. 343 m/s durch die Luft bewegt<sup>6</sup>, ist dieser Zeitunterschied nicht aktiv wahrnehmbar. Diese Sinneszellen nutzen ihn aber, um ein Geräusch zu lokalisieren. Durch die wellenförmige Ausbreitung des Schalls kommt es auch zu einem *Phasenversatz*. Zusätzlich wirkt die *Ohrmuschel* als Richtungsfilter. Durch ihre Form werden je nach Richtung der einfallenden Schallwellen andere Bereiche der Ohrmuschel stimuliert.

### Bedeutung in der virtuellen Realität

Akustische Ausgaben sind neben der grafischen Darstellung die häufigste Modalität in der VR. Bereits 1990 wurde das EyePhone als HMD mit akustischer Ausgabe entwickelt [Teitel, 1990]. Als Ausgabemedium dienen dabei entweder Lautsprecher oder Kopfhörer. Ähnlich der grafischen Renderingmethoden gibt es verschiedene Ansätze, die akustische Ausgabe einer virtuellen Welt zu berechnen. Dabei spricht man von einer **Auralisation**<sup>7</sup> der virtuellen Welt. Klangquellen emittieren ihre Wellen in alle Richtungen. Zur genauen Bestimmung des Klangs muss berechnet werden, wie diese Wellen zu einem bestimmten Zeitpunkt am Ohr ankommen. Die Schwierigkeit ist dabei die Berechnung der Schallausbreitung, unter Einbeziehung der Reflexion, Beugung und Brechung, die an Objekten der Welt entstehen. Nach [Funkhouser et al., 2003] können drei unterschiedliche Ansätze zur Lösung dieses Problems unterschieden werden:

1. **Die numerische Lösung** des Wellenfelds beruht auf der Berechnung der Wellengleichung und ist ein sehr rechenintensives Verfahren. Als Ergebnis entsteht ein durch Lautsprecher begrenzter Klangraum, in dem, unabhängig von der Zuhörerposition, ein akustisches Modell des virtuellen Raums wiedergegeben wird. Diese Methode bietet ein großes Potential in Mehrbenutzerinstallationen, aber die Rechenkosten sind meist zu hoch, um eine interaktive Berechnung zu gewährleisten. [Husung, 2012] stellt ein System vor, in dem Klangcharakteristika während eines Produktentwicklungszyklusses mittels Wellenfeldsynthese in Echtzeit wiedergegeben werden können.
2. **Geometrische Methoden** berechnen akustische Effekte anhand von Algorithmen, welche signifikante Pfade der Schallwellen von der Quelle bis zum Hörer

---

<sup>6</sup>Schallgeschwindigkeit in trockener Luft bei 20°C

<sup>7</sup>Hörbarmachung

suchen. Es wird zwischen dem *direkten Sound*, der unmittelbar gehört wird, den *frühen Reflexionen*, die zwischen 20 und 80 ms später am Ohr ankommen, und dem *Nachhall*, der erst, wenn er von vielen Oberflächen abgeprallt ist, bei dem Hörer ankommt, unterschieden [Begault, 1994]. Zu diesen Algorithmen zählt beispielsweise das *Raytracing*<sup>8</sup>, bei dem an der Soundquelle Strahlen in unterschiedliche Richtungen ausgesendet und bis zum Hörer verfolgt werden. Das resultierende Klangbild ist abhängig von der Benutzerposition, bei genügend berechneten Strahlen aber sehr realistisch.

3. Wahrnehmungsbasierte **statistische Modelle** liefern keine akkuraten Ergebnisse. Dabei wird anhand der Umgebung eine Annahme über die mögliche Schallausbreitung aufgestellt und durch Verwendung geeigneter Filter eine Wiedergabe mit Nachhall und frühen Reflexionen abgespielt. Diese Methoden benötigen am wenigsten Rechenzeit und können somit auch parallel in zeitkritischen Anwendungen genutzt werden.

Bei der Verwendung von Kopfhörern zur künstlichen Generierung der berechneten akustischen Ausgabe werden meist **Head-Related Transfer Functions** (kurz: HRTFs) eingesetzt [Begault, 1994]. Dabei kommen Filter, die den Einfluss von Kopf, Schulter und Rumpf auf die eintreffenden Schallwellen simulieren, zum Einsatz. HRTFs können annähernd geschätzt werden, indem der Oberkörper als einfacher Block dargestellt wird oder anhand von realen Modellen gemessen wird. Bei einer Wiedergabe über Lautsprecher muss diese Problematik nicht berücksichtigt werden, da die Schallwellen den realen Körper des Zuhörers noch passieren müssen. Um akustische Signale auszugeben, die aus unterschiedlichen Richtungen in der virtuellen Welt kommen können, werden Lautsprecherarrays eingesetzt. Abgesehen von der Wellenfeldsynthese, bei der meist Arrays von über 150 Lautsprechern eingesetzt werden, gibt es das **Vector-based Amplitude Panning** (VBAP) [Begault, 1994] (siehe auch Abschnitt 4.3.3). Bei diesem Verfahren sind weit weniger Lautsprecher nötig – in kleineren Interaktionsräumen sind es häufig acht (angebracht in den Ecken des Raums). Für eine Soundquelle werden drei Lautsprecher ausgewählt, die der virtuellen Quelle am nächsten sind. Die Position der virtuellen Soundquelle bestimmt dann, mit welcher Lautstärke abgespielt wird. Dieses simple Verfahren kann sehr gute Phantomschallquellen erzeugen, insbesondere auch bei mehreren

---

<sup>8</sup>deutsch: Strahlenverfolgung

Quellen. Von Nachteil ist, dass Soundquellen, die sehr nah am Hörer sind, nicht gut dargestellt werden können und es in dem Interaktionsraum meist einen sweet-spot<sup>9</sup> gibt.

### 2.2.3. Haptische Stimuli

Der haptische Sinn umfasst die taktile Wahrnehmung (Oberflächensensibilität) und die Propriozeption (Tiefensensibilität). Es handelt sich um den Sinn mit der größten Fläche – Rezeptoren sind auf der ganzen Haut und im Inneren des Körpers verteilt. Die Wahrnehmung von Reizen an der Haut wird als Oberflächensensibilität bezeichnet und kann in Mechano-, Thermo- und Schmerz Wahrnehmung unterteilt werden. Schmerz- und Temperaturreize werden schnell und unpräzise verarbeitet, da die Wahrnehmung meist als Schutzmechanismus dient. Die Mechanorezeption hingegen reagiert auf Druck, Berührungen, Vibrationen und Dehnung. Reize werden erst gefiltert, bevor sie weiter verarbeitet werden. Es kann eine sehr präzise Wahrnehmung erfolgen.

#### Bedeutung in der virtuellen Realität

Haptisches Feedback in virtuellen Welten benötigt ein Ausgabemedium, mit dem an der Haut des Besuchers Reize platziert werden können. Die Techniken reichen von Eingabegeräten mit einfacher Vibrationsmöglichkeit bis hin zu komplexen Installationen mit denen sehr feine Reize, in Bezug auf Härte, Gewicht, Temperatur und Widerstand, generiert werden können. Je nach Anwendungsfall haben beide Systeme Vor- und Nachteile. Eingabegeräte mit integriertem Feedback sind kostengünstig und können flexibel eingesetzt werden, bieten aber keine realistische Repräsentation der haptischen Eigenschaften. Wenn eine möglichst detailgetreue Darstellung erforderlich ist, müssen stationäre Systeme (z.B. ein PHANTOM-Arm [Massie und Salisbury, 1994]) eingesetzt werden (Abbildung 2.9(a)). Damit können virtuelle Objekte sehr realistisch greifbar gemacht werden, aber bauartbedingt ist der Besucher sehr eingeschränkt. Eine sinnvolle Kombination mit großen VR-Installationen (z.B. einer CAVE) ist nicht möglich. Kleinere Eingabegeräte besitzen entweder eine Vibrationsmöglichkeit, eine Technik die auch häufig bei Spielekonsolen eingesetzt wird. Alternativ gibt es Handschuhe, die gezielte taktile Stimuli ermöglichen (vgl. Abbildung 2.9(b)). Beispielsweise besitzen die Datenhandschuhe der Firma A.R.T. an den Fingerspitzen jeweils drei kleine Drähte. Durch Erwärmung werden die Drähte verkürzt und der Besucher spürt eine Berührung der Fingerspitzen.

---

<sup>9</sup>die Position im Interaktionsraum, an dem die Ausgabe optimal ist



(a) PHANToM-Device [Massie und Salisbury, 1994] (b) VPL-Cybergloves wie in der AG WBS eingesetzt.

Abbildung 2.9.: Eingabegeräte, die zur Simulation von haptischem Feedback genutzt werden können.

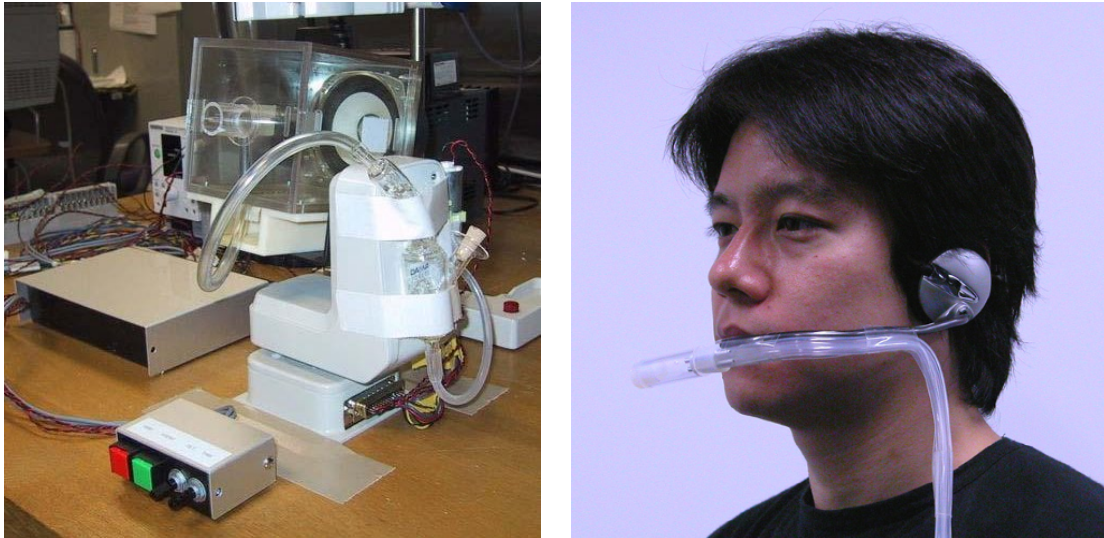
Da der Temperatursinn auch zu den haptischen Reizen gezählt wird, gehören Systeme die solche Ausgaben beinhalten, zu den Systemen mit haptischer Ausgabe. Wind und Wärme werden im Kontext virtueller Welten noch recht selten eingesetzt, sodass noch keine standardisierten Ausgabemedien entwickelt wurden. Da diese Ausgaben aber im Rahmen dieser Arbeit integriert wurden (siehe Kapitel 4), wird diese Anreicherung in den Abschnitten 3.1.3 und 3.1.4 anhand exemplarischer Systeme genauer besprochen.

### 2.2.4. Olfaktorische und gustatorische Stimuli

Olfaktorische Wahrnehmung (auch Geruchssinn) beschreibt die Fähigkeit des Menschen, Gerüche wahrzunehmen, und ist eng verknüpft mit der gustatorischen Wahrnehmung – dem Schmecken. Duftmoleküle werden an der Nasenschleimhaut gebunden und führen zu einer Aktivierung der Geruchszellen. Die so ausgelösten Potentiale sind sowohl mit dem Riechzentrum im Gehirn als auch mit dem Emotionszentrum und dem Gedächtnis verbunden. Das gustatorische System (der Geschmack) ist im Gegensatz zum olfaktorischen System ein Nahsinn – die Reize müssen direkt an der Zunge anliegen, um eine Reaktion auszulösen. Die Rezeptorzellen sind dabei in sogenannten Geschmacksknospen auf der Zunge und im Mundraum verortet.

#### Bedeutung in der virtuellen Realität

Olfaktorische Ausgaben haben nur eine geringe Bedeutung in aktuellen virtuellen Welten. Zwar gibt es seit langer Zeit die Idee eines “Geruchskinos” – die entsprechende



(a) Geruchskanone [Yanagida et al., 2004] (b) Tragbare Einheit [Yamada et al., 2006]

Abbildung 2.10.: Olfaktorische Displays für virtuelle Welten.

Technik wurde bisher noch nicht entwickelt. Die olfaktorische Ausgabe besteht dabei aus zwei Schritten. Zum einen müssen die Gerüche mit Verfahren der Parfümherstellung erzeugt und gespeichert werden, zum anderen ist es nötig, diese Gerüche dem Besucher zur passenden Zeit zu präsentieren. Ähnlich der grafischen und akustischen Ausgabe, spricht man auch von **olfaktorischem Rendern**.

Globale Systeme haben den Nachteil, dass sie einen ganzen Raum mit Gerüchen füllen. Nicht die Generierung von Gerüchen ist das Hauptproblem, sondern der Wechsel von einem zum anderen und insbesondere das Neutralisieren. Eine beispielhafte Implementierung, die diese Probleme minimiert, wurde 2004 vorgestellt [Yanagida et al., 2004]. Das System besteht aus einem “Nose-tracker” und einer “Geruchskanone” (siehe Abbildung 2.10(a)), sodass zu jeder Zeit bekannt ist, wo sich die Nase des Betrachters befindet. So kann die Geruchskanone die Duftstoffe zielgenau dorthin befördern. Deswegen werden nur geringe Mengen freigesetzt, die von weiteren Gerüchen überdeckt werden können.

Lokale Displays haben den Vorteil, dass sie die Gerüche nur direkt an der Nase erzeugen. Der große Nachteil dabei ist, dass die Geräte an dem Besucher montiert werden müssen, was häufig als große Einschränkung wahrgenommen wird (vgl. Abb. 2.10(b)). Somit ist zu überprüfen, ob die Immersion wirklich erhöht oder durch die Verkabelung eher verringert wird. Mögliche Ansätze finden sich beispielsweise bei [Yamada et al., 2006] und [Hirota et al., 2013].

### 2.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der Generierung und Evaluation multisensorischer virtueller Welten erörtert. Dabei wurden wichtige Definitionen und Begrifflichkeiten eingeführt, die in den folgenden Kapiteln benötigt werden. Die Definition von **Präsenz** als zentraler Punkt für virtuelle Welten bedingte die Ausarbeitung möglicher Messverfahren für subjektive Erfahrungen. Betrachtungen verschiedener Verfahren und Forschungsergebnisse der vergangenen Jahre ermöglichen eine Auswahl an geeigneten Werkzeugen zur Durchführung einer empirischen Studie (siehe Kapitel 6).

Das zu Beginn vorgestellte AIP (Autonomie, Interaktion, Präsenz)-Modell von [Zeltzer, 1992] bietet eine Grundlage zur Auswahl geeigneter Verfahren und zum Vergleich von Systemen zur **Generierung multisensorischer Stimuli** in virtuellen Welten. Insbesondere die Definition der Präsenz-Achse als “ein grobes Maß der Anzahl und Glaubwürdigkeit von vorhandenem Sensor In- und Output” deckt sich mit dem erarbeiteten Teilziel 1 (siehe Abschnitt 1.2). Die Definition einer weiteren Dimension durch autonome Faktoren wurde in der eingehenden Zielsetzung nicht berücksichtigt. Motiviert durch Zeltzer’s Arbeiten wird in Kapitel 7 die prototypische Integration eines virtuellen Menschen betrachtet.

Als zentraler Aspekt wurde zudem der Mensch betrachtet, der als Besucher einer virtuellen Welt mit all seinen Sinnen einbezogen werden soll. Der menschliche Wahrnehmungsapparat ist komplex und die Entwicklung technischer Systeme bedingt ein Verständnis des anzusprechenden Sinns. Es wurde der Grundstein für die in Kapitel 4 beschriebene technische Integration multisensorischer Stimuli gelegt. Die Erstellung virtueller Welten ist eine zeitintensive Aufgabe, die durch neue Technologien zumeist noch erhöht wird. **Wissensbasierte Methoden** bieten eine Basis, um diesem Trend entgegen zu wirken; die hier vorgestellten Grundlagen ebnen den Weg für das entwickelte Softwareframework (Kapitel 5).

## VERWANDTE ARBEITEN

Aufbauend auf den Grundlagen (Kapitel 2) werden im folgenden Kapitel verwandte Arbeiten vorgestellt, die sich mit relevanten Teilaspekten dieser Dissertation auseinandergesetzt haben. Seit der Entwicklung des Sensoramas [Heilig, 1962] hat es nur wenige Systeme mit einer solchen Vielfalt an multisensorischen Stimuli gegeben. Dies wurde in der Einleitung als Motivation herangezogen, um ein solches System neu zu konstruieren und seine Vor- und Nachteile zu beleuchten. In Bezug auf die einzelnen Stimuli wurden in den vergangenen Jahren einige Verfahren mit verbesserter Ausgabequalität entwickelt. Beginnend mit Arbeiten zur Einbindung und Evaluation kombinierter multisensorischer Stimuli im Kontext virtueller Welten werden die einzelnen Ausgabemodalitäten getrennt besprochen. Eine Diskussion der Vor- und Nachteile ebnet den Weg für die eigene Realisierung (Teilziel 1), wie sie anschließend in Kapitel 4 vorgelegt wird. Dabei werden auch empirische Untersuchungen vorgestellt, wobei Fachbegriffe in Fußnoten kurz erläutert werden und zum Beispiel in [Field, 2009] oder [Bordens und Abbott, 2002] detailliert nachgelesen werden können.

Zusätzlich werden Arbeiten aus dem Bereich der intelligenten virtuellen Welten vorgestellt. Sie bilden die Grundlage zur Umsetzung von Teilziel 2, die Entwicklung eines wissensbasierten Verfahrens zur Generierung multisensorischer Stimuli in virtuellen Welten mit möglichst wenig Arbeitsaufwand. In der Motivation wurde schon angeführt, dass es nur wenige solcher Systeme gibt, da die Entwicklung sehr komplex ist und die benötigten Ressourcen oft nicht vorhanden sind. Wissensbasierte Methoden konnten schon in anderen Anwendungsbeispielen erfolgreich eingesetzt werden, um komplexe Entwicklungsaufgaben zu vereinfachen. Eine Auswahl an Projekten, die erfolgreich zu der Entwicklung

intelligenter virtueller Welten geführt haben, wird vorgestellt. Die hier besprochenen Ansätze werden in Kapitel 5 aufgegriffen, um geeignete Verfahren bei der Lösung von Teilziel 2 auszuwählen.

## 3.1. Multisensorische Stimulation

35 Jahre nach der Erfindung des Sensoramas stellten [Dinh et al., 1999] fest, dass die Integration multisensorischer Stimuli gegenüber der graphischen Ausgabe in den Hintergrund getreten war. Um herauszufinden, welchen Einfluss diese auf die Präsenz haben, führten sie eine Studie durch. Den Versuchsteilnehmern wurde ein virtueller Bürokomplex mit unterschiedlichen Kombinationen folgender Ausgabemodalitäten präsentiert, wobei ein Between-subject-Design<sup>1</sup> gewählt wurde:

- Die **visuelle Ausgabe** wurde über ein HMD präsentiert. Die präsentierte grafische Welt war ein Bürogebäude mit unterschiedlichen Räumen, in denen ein vorgeschriebener Weg abgegangen wurde.
- **Akustische Stimuli** beinhalteten Stereo-Soundquellen, die über Kopfhörer präsentiert wurden. Entfernungen wurden über Lautstärkeanpassungen realisiert.
- **Taktile Reize** in Form von Wind und Wärme konnten präsentiert werden. Der Wind eines virtuellen Ventilators wurde durch einen vor dem Versuchsteilnehmer angebrachten Ventilator simuliert. Abschließend betraten die Versuchsteilnehmer einen Balkon, auf dem die Sonne schien. Diese wurde durch eine Wärmelampe nachempfunden.
- Ein **olfaktorischer Reiz** konnte präsentiert werden, wenn die virtuelle Kaffeemaschine im Empfangsbereich sichtbar war. Um den Kaffee zu riechen, mussten die Versuchspersonen eine Maske tragen, die mit einer Kaffeepumpe verbunden war. Es konnte Kaffeegeruch in die Maske eingelassen und beim Betreten eines anderen Raums wieder entfernt werden.

Jede Modalität konnte in zwei Ausprägungen gezeigt werden. Die grafische Ausgabe wurde entweder in guter Qualität, mit lokalen Lichtquellen und hochaufgelösten Texturen, oder in abgeschwächter Qualität, mit nur 25% Auflösung und ausschließlich globaler

---

<sup>1</sup>Ein Versuchsaufbau, bei dem die Versuchspersonen in Gruppen aufgeteilt werden und jeder Gruppe genau eine Kondition präsentiert wird.



Beleuchtung, dargestellt. Alle anderen Modalitäten wurden entweder komplett oder gar nicht präsentiert. Im Gesamten ergibt sich daraus ein  $2 \times 2 \times 2 \times 2$ -Versuchsdesign<sup>2</sup>, also insgesamt 16 Konditionen. [Dinh et al., 1999] führten die Studie mit 322 Teilnehmern durch, sodass in jeder Kondition mindestens 20 Datensätze gesammelt werden konnten. Bei einem Between-subject-Design (s.o.) empfiehlt sich eine Anzahl von 15-20 Teilnehmern pro Gruppe, um den Einfluss von Störvariablen<sup>3</sup> gering zu halten.

Die Daten wurden mittels verschiedener Fragebögen erhoben (siehe Anhang A), objektive Messverfahren (vgl. Abschnitt 2.1.2) kamen nicht zum Einsatz. Das subjektive Empfinden von Präsenz wurde mittels eines Fragebogens mit 13 Items<sup>4</sup> erfasst. Zusätzlich sollten die Teilnehmer eine Selbsteinschätzung ihrer Präsenz auf einer Skala von 1 bis 100 vornehmen. Neben der Präsenz wurden 14 Gedächtnisfragen gestellt, anhand derer überprüft wurde, wie gut sich die Besucher an die virtuelle Welt erinnern konnten und um den **Einfluss multisensorischer Stimuli auf die Gedächtnisleistung** zu überprüfen.

Bezüglich der Präsenz konnte eine signifikant bessere Bewertung gemessen werden, wenn auditive oder taktile Stimuli präsentiert wurden. Für die olfaktorische Ausgabe gab es einen nicht signifikanten Trend in die gleiche Richtung. Die Gedächtnisfragen standen in starkem Zusammenhang mit den multisensorischen Stimuli. Versuchspersonen, die die Kaffeemaschine nicht nur gesehen, sondern auch gerochen hatten, erinnerten sich weit häufiger daran. Ebenso wurde ein Ventilator viel häufiger erinnert, wenn die Versuchsperson seinen Wind gespürt hatte.

Interessant ist, dass die **grafische Ausgabequalität** in dieser Studie keinen Einfluss auf die Präsenz hatte. Dieser Effekt wurde von Paul Zimmons im Rahmen von vier Studien eingehender untersucht [Zimmons, 2004]. Dabei wurde insbesondere die Beleuchtungsqualität variiert, aber auch die Texturauflösung. In einer Virtual-Pit-Umgebung wurde sogar eine komplett beleuchtungs- und texturfreie Kondition präsentiert, zu sehen war nur ein Gitter. Es konnte kein Zusammenhang zwischen grafischer Ausgabequalität und Präsenz gemessen werden, weder mit Fragebögen noch mit der objektiven Messungen der

---

<sup>2</sup>Die Anzahl der Gruppen wird mit  $N \times N$  angegeben. Dabei steht die Anzahl der angegebenen  $N$  (hier: 4) für die unabhängigen Variablen (hier: visuelle, akustische, taktile und olfaktorische Ausgaben). Der Wert von  $N$  bezeichnet die Anzahl der möglichen Belegungen dieser Variable (hier: jeweils 2 (an/aus)).

<sup>3</sup>Als Störvariable (auch Störfaktor/Drittfaktor) bezeichnet man Faktoren (meist personenbezogene Merkmale und äußere Faktoren), die innerhalb des Experiments nicht gezielt manipuliert werden können, aber das Ergebnis beeinflussen.

<sup>4</sup>Als Item wird in einem psychologischen Test eine einzelne Aufgabe/Frage bezeichnet.

### 3. VERWANDTE ARBEITEN

---

Herzrate [Zimmons und Panter, 2003]. Auf Basis ihrer Untersuchung schlagen die Autoren vor, anstatt rechenintensive Verbesserungen der visuellen Qualität vorzunehmen, zusätzliche multisensorische Stimuli einzubeziehen.

In Bezug auf Korrelationen<sup>5</sup> zwischen den Variablen konnten [Dinh et al., 1999] keine signifikanten Daten erheben. Die Autoren schlossen daraus, dass multisensorische Stimuli in einer rein additiven Weise funktionieren – je mehr, desto besser. Um zu überprüfen ob dies noch gültig ist, wird in Kapitel 6 eine Studie vorgestellt, durch deren Ergebnisse diese Schlussfolgerung hinterfragt werden muss. Im Folgenden werden zunächst Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Einbindung einzelner Modalitäten befassen, um eine möglichst realistische Ausgabe zu generieren.

#### 3.1.1. Akustische Ausgaben

Die Erweiterung virtueller Welten um akustische Ausgaben ist schon länger aktueller Stand der Technik. Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits vorgestellt, wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt, um realistische akustische Ausgaben konsistent zur virtuellen Welt wiederzugeben.

Um eine einfache Integration von akustischen Ausgaben innerhalb einer Anwendung zu ermöglichen, wurden verschiedene Audiobibliotheken entwickelt. Sie übernehmen insbesondere das “Digital Mastering”, ein Prozess bei dem aus vielen einzelnen Soundquellen eine Gesamtausgabe berechnet wird. Zusätzlich wird die Ansteuerung der Hardware übernommen. Die standardisierte und plattformunabhängige Schnittstelle **OpenAL** (Open Audio Library) wurde von Creative Technology entwickelt [Hiebert, 2005]. Ziel war es, eine Spezifikation für akustische Ausgaben vorzugeben, wie es für die grafische Ausgabe mittels OpenGL (Open Graphics Library) bereits seit 1992 möglich war. Sie ist quelloffen verfügbar und bietet die Möglichkeit, räumliche Soundeffekte in eine Anwendung einzubinden. Durch eine Hardwarebeschleunigung können Berechnungen effizient durchgeführt werden. Die Audio-Bibliothek **FMOD** [fmod, 2010] stellt ein weiteres Beispiel dar. FMOD bietet die Möglichkeit, Musikdateien verschiedenster Formate zu laden und abzuspielen. Die Bibliothek verfügt damit über einen ähnlichen Funktionsumfang wie OpenAL, ist jedoch etwas moderner und bietet eine weiter entwickelte Programmierschnittstelle (API). Sie steht außerdem für viele verschiedene Plattformen zur Verfügung.

---

<sup>5</sup>Eine Korrelationsanalyse ermöglicht Aussagen über den Zusammenhang zwischen zwei Variablen. In diesem Beispiel ist damit eine Interaktion der einzelnen Modalitäten gemeint.

Im Gegensatz zu OpenAL ist FMOD jedoch nur für nichtkommerzielle Zwecke kostenfrei, während es für die kommerzielle Nutzung, wie etwa in zahlreichen Computerspielen, verschiedene Lizenzen gibt.

Als Beispiel für ein neuentwickeltes System stellt [Husung, 2012] eine flexible audiovisuelle Stereo-Projektionseinrichtung (kurz: FASP) vor, die an der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie (IDMT) entwickelt wurde. In der virtuellen Planung von Produkten oder Gebäuden ist es oft notwendig, einen genauen Eindruck der zugehörigen Akustik zu bekommen. Durch die Auralisierung mittels einer Wellenfeldsynthese können so in Echtzeit realistische akustische Welten gerendert werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Das System bietet die Möglichkeit, schon während des Produktentwicklungsprozesses die akustischen Eigenschaften zu explorieren.

[Lentz et al., 2007] entwickelten ein System, mit dem die Geräuschkulisse abhängig von den virtuellen Räumen in Echtzeit berechnet werden kann. Eine Besonderheit des Systems ist es, dass die Genauigkeit der Berechnung der sonstigen Rechenlast angepasst wird. Daraus resultiert ein echtzeitfähiges System, das in rechenintensiven Situationen eine etwas ungenauere akustische Ausgabe erzeugt. Als Voraussetzung müssen alle Objekte mit Materialeigenschaften modelliert werden, insbesondere mit Informationen bezüglich Streuungs- und Absorptionsverhalten von Schallwellen.

Im Rahmen einer Benutzerstudie wurde festgestellt, dass die akustischen Ausgaben zu einer besseren task-performance und einer erhöhten Präsenz führen, besonders dann, wenn die akustischen Ausgaben in einer starken Verbindung zu visuellen Objekten stehen [Larsson et al., 2001]. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Anwesenheit einer akustischen Ausgabe über eine schlechtere grafische Darstellung hinweg helfen kann. Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass eine akustische Ausgabe in virtuellen Welten sinnvoll ist.

#### 3.1.2. Natürliche Interaktion

Betrachtet man eine natürliche Interaktion mit virtuellen Welten, so müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Durch die Kombination der drei Teilaspekte (1) intuitive Interaktion, (2) taktiles Feedback bei Berührung und (3) realistische Reaktion auf Manipulationen kann ein zufriedenstellendes Interface geschaffen werden.

**Intuitive Interaktion** findet statt, wenn bereits vorhandenes Wissen zur Interaktion

### 3. VERWANDTE ARBEITEN

---

mit einer virtuellen Welt eingesetzt werden kann. Als Schnittstelle dient eine Eingabe über die Hände mithilfe von Datenhandschuhen. Eine sehr intuitive Interaktion wurde zum Beispiel von [Latoschik, 2001] entwickelt. Ausgestattet mit Handschuhen, über die eine genaue Posturbestimmung der Hand erfolgt, und einem Mikrofon zur Sprachinteraktion kann der Besucher sehr natürlich mit dem System interagieren. In dem Projekt Virtuelle Werkstatt wurde dieses Verfahren eingesetzt [Biermann et al., 2002]. Die Aussage ‘‘Gib mir ein Rad’’ resultierte in der Erzeugung eines Rades. Die Äußerung ‘‘Drehe es so herum’’ begleitet von einer drehenden Geste der Hand parallel zu dem Wort ‘‘so’’ konnte in eine entsprechende Rotationsbewegung umgesetzt werden. Neben einer Handschuh-basierten Interaktion gibt es markerlose Verfahren. Mit Hilfe der Microsoft-Kinect-Tiefenkamera können Eingaben mit den bloßen Händen durchgeführt werden [Wachs et al., 2011]. Die Präzision ist allerdings geringer als mit klassischen Trackingverfahren, so dass diesen im Rahmen großer Virtual-Reality-Installationen der Vorzug gegeben werden sollte.

**Taktiler Feedback** wird generiert, wenn ein virtuelles Objekt berührt wird. Dies kann die Präsenz erhöhen. Im optimalen Fall soll ein umfassendes Gefühl der Oberfläche vermittelt werden, wobei auch verschiedene Nuancen der Beschaffenheit wahrgenommen werden können [Burdea, 1996]. [Patrick, 1990] entwickelte Schwingspulen, um mithilfe eines Exoskeletts Vibrationen auf die Fingerspitzen zu übertragen. Er legte damit den Grundstein für Entwicklungen wie das PHANTOM-Device [Massie und Salisbury, 1994]. Studien belegen, dass eine Ausgabe von taktilen Reizen sinnvoll ist. Beispielsweise fanden [DiZio und Lackner, 2002] heraus, dass Objektpositionen deutlich genauer bestimmt werden können, wenn sie auch mit taktiler Feedback und nicht nur visuell präsentiert werden.

Eine **realistische Reaktion** des Systems auf Benutzerinteraktionen setzt meist eine physikalische Simulation der virtuellen Welt voraus. Solche physikalischen Simulationen erhöhen die Konsistenz einer virtuellen Welt und verbessern die Präsenz [Hassenzahl, 2003]. Die Berechnung wird meist von kommerziellen Physik-Engines übernommen (z.B.: *PhysX-Engine* von Nvidia, *Havok-Engine* von Intel). Eine frei verfügbare Engine ist die Open Dynamics Engine (ODE), mit der Simulationen von Starrkörpern, die über Gelenkverbindungen verknüpft werden können, möglich sind [Smith, 2006]. Sie zeichnet sich durch schnelle und robuste Berechnungen aus, allerdings können keine objektspezifischen Reibungseigenschaften (Rollreibung, Luftwiderstand u.ä.) berücksichtigt werden.

### 3.1.3. Wind

Der Einsatz von Wind in der virtuellen Realität ist ein wenig erforschtes Feld. Eine beispielhafte Implementierung wurde 2006 in dem Projekt **VR-Scooter** vorgenommen [Deligiannidis und Jacob, 2006], um eine möglichst intuitive Fortbewegungsmöglichkeit für große virtuelle Welten zu entwerfen. Es bietet sich an, eine Methode zu entwickeln, die auch von Anfängern leicht angewandt werden kann, da sie auf Wissen aus der realen Welt zurückgreifen können. Ein “Scooter” (dt.: Roller) (Abbildung 3.1(a)) erfüllt dieses Kriterium. Um ein Gefühl für die Geschwindigkeit zu vermitteln, wurde ein Windsystem entwickelt, das in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit die Drehzahl eines Ventilators steuert. Zusätzlich sind am Lenkrad vibrotaktile Sensoren angebracht, die in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit vibrieren.

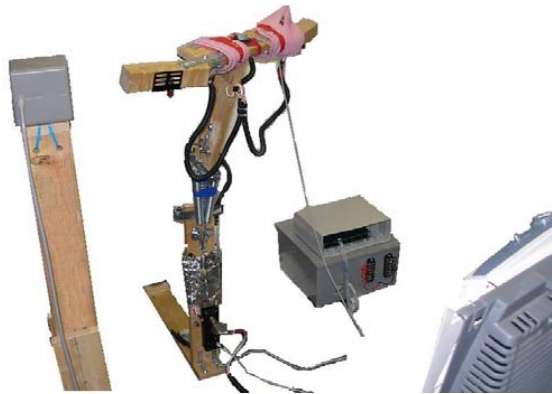
In dem vorgestellten System gab es nur einen stationären Ventilator und somit keine Richtungsanpassung. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass Besucher eine Navigationsaufgabe in kürzerer Zeit erledigen konnten, wenn sie Fahrtwind verspürten. Die Versuchsteilnehmer mussten dabei ähnlich wie in einer Fahrsimulation von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt fahren. Jedes Mal, wenn ein Fehler passierte, wurden Strafzeiten verhängt. Teilnehmer, die Wind verspürten, waren im Durchschnitt 100 Sekunden schneller am Ziel. Außerdem erfolgte bei ihnen eine bessere Bewertung in Bezug auf Präsenz und Realismus. Es wurde kein fester Präsenzfragebogen verwendet, sondern sieben von den Autoren entwickelte Fragen, die zum Teil in direkter Verbindung mit dem Scooter standen.

Ein **Ring aus Ventilatoren** (Abbildung 3.1(b)), der von Sylvain Cardin für die Anwendung mit einem Head-Mounted Display (HMD) vorgestellt wurde, ist flexibler [Cardin et al., 2007]. Er besteht aus acht Ventilatoren, die gleichmäßig um den Kopf der Nutzer verteilt sind und sich einzeln und stufenlos ansteuern lassen. Somit lässt sich ein Umgebungswind darstellen, der in Richtung und Stärke an die Position und Ausrichtung des Benutzers in der virtuellen Welt angepasst werden kann. Die Verwendung ist nur in Verbindung mit einem HMD sinnvoll, da ansonsten das Gesichtsfeld durch die Ventilatoren zu weit eingeschränkt würde. Würden die kleinen Ventilatoren weiter entfernt platziert, wäre ihre Luftleistung zu gering.

Der **WindCube** von [Moon und Kim, 2004] ist ein 1m x 1m x 2m großer Kubus (LxBxH) mit 20 befestigten Ventilatoren. Vier befinden sich oberhalb des Besuchers (von schräg oben), acht auf Kopfhöhe und weitere acht auf Höhe der Oberschenkel. Ei-

### 3. VERWANDTE ARBEITEN

---



(a) Der VR-Scooter von [Deligiannidis und Jacob, 2006].



(b) Das System von [Cardin et al., 2007] mit dem Ring aus Ventilatoren.

Abbildung 3.1.: Beispielhafte Integration von Wind in VR-Szenarien. Links der VR-Scooter, ein virtueller Roller, bei dem der Wind ein Gefühl für die Geschwindigkeit vermitteln soll. Rechts ein Ring aus Ventilatoren, der direkt am Kopf des Besuchers angebracht wird.

ne solch distinguierte Windabdeckung wurde in dem System erstmalig realisiert. Der große Nachteil dieser Installation ist, dass es nicht möglich ist, den Wind in Echtzeit zu berechnen. Mithilfe eines Editors muss das Windfeld für die gesamte Szene im Vorfeld erstellt werden. Eine Anpassung an die Handlungen des Besuchers erfolgt nicht. Eine Benutzerstudie zeigte, dass es nicht möglich ist, zwei benachbarte Ventilatoren zu unterscheiden, wenn ihr Abstand geringer als  $45^\circ$  ist. Somit ist es nicht notwendig, mehr als 8 Ventilatoren in einer Ebene (kreisförmig um den Besucher angeordnet) anzubringen. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass der Wind natürlich empfunden wird, wenn er von 2-3 benachbarten Ventilatoren erzeugt wird, statt nur von einem. Die horizontale Unterscheidung ist dabei genauer als die vertikale. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Planung von neuen Ventilatorsystemen.

Ein Vergleich der Effektivität von globalen und lokalen Installationen wurde von [Lehmann et al., 2009] durchgeführt. Zwölf Versuchspersonen testeten eine Skisimulation, wobei sie in drei unterschiedlichen Konditionen Münzen einsammeln und Hindernissen ausweichen mussten:

1. **Kein Wind** – es wurden nur visuelle Hinweise (wehende Schneeflocken) gegeben

2. **Globales Display** – bestehend aus zwei Ventilatoren mit 15 cm Durchmesser, an einem Gestell befestigt
3. **Lokales Display** – bestehend aus zwei an einem Fahrradhelm befestigten PC-Lüftern

Im Rahmen der Studie hat jede Versuchsperson alle drei Bedingungen getestet, die Reihenfolge wurde variiert. Zur Bestimmung der Präsenz wurde der von [Schubert et al., 2001] entwickelte *Igroup Presence Questionnaire* nach jedem Durchlauf ausgefüllt. Die Auswertung zeigte, dass alle abgefragten Präsenzfaktoren in den Konditionen mit Wind signifikant ( $p < .0001$ ) höher bewertet wurden als in der Kondition ohne Wind. Eine qualitative Befragung nach der beliebtesten Bedingung ergab, dass 75% der Kandidaten Kondition 2 (das globale Display) am realistischsten empfanden und nur 25% Kondition 3 (lokal). Daraus ergibt sich die Empfehlung, ein globales Windsystem zu verwenden, dessen Ventilatoren ca. 45° voneinander entfernt sind. Die erzeugten Reize sollten konsistent mit der visuellen virtuellen Welt sein, und sich in Echtzeit anpassen.

Im Bereich der **thermischen Realität** wird Wind eingesetzt, um Temperaturänderungen zu simulieren. In der virtuellen Hölle (“virtual hell” [Dionisio, 1997]) werden diese mit Hilfe von Infrarotlampen und Ventilatoren generiert. Hauptsächlich handelt es sich dabei aber um eine Wärmesimulation.

#### 3.1.4. Wärme

In der Literatur werden Wärmesimulationen zur Integration in virtuelle Welten noch seltener besprochen als der Einsatz von Wind. 1996 veröffentlichte [Dionisio, 1996] einen guten Einstieg und Überblick in das Themengebiet. Seine Ziele fasst er wie folgt zusammen:

1. Die Hardware muss ein Temperaturgefühl generieren, das vom Computer aus gesteuert werden kann.
2. Das System muss mit der VR-Anwendung kommunizieren und in Echtzeit auf Anpassungen reagieren.
3. Sensoren müssen die thermische Umgebung aufnehmen und die Daten an die Temperaturquelle weiterleiten.

### 3. VERWANDTE ARBEITEN

---

4. Die Hardware sollte transportabel sein und in einer typischen Arbeitsumgebung lauffähig sein.
5. Die Temperaturerzeugung soll nur lokal geschehen; die Umgebung sollte von den Temperaturänderungen so wenig wie möglich betroffen sein. Zeitgleich soll die Bewegungsfreiheit nicht eingeschränkt werden.
6. Die Hardware sollte modular und erweiterbar sein.
7. Der Anwender darf auf keinen Fall Gefahren ausgesetzt werden.
8. Es sollte eine übliche Stromquelle genutzt werden.
9. Wärmequellen müssen eine physikalische Temperaturänderung produzieren. Dabei sollen nicht alleine Änderungen der Lufttemperatur betrachtet werden, sondern auch Luftbewegung, Luftfeuchtigkeit und Wärmestrahlung.

Ausgehend von diesen Anforderungen untersuchte Dionisio einige mögliche Geräte (dargestellt in Abbildung 3.2) auf ihre Gebrauchstauglichkeit. Handelsübliche **Klimaanlagen** können die Temperatur in einem ganzen Raum anpassen, sind jedoch sehr teuer und haben eine lange Reaktionszeit. Kurzfristige Temperaturänderungen können nicht erzielt werden. **Konvektoren** können einen Raum erhitzen und würden in Verbindung mit Klimaanlage Temperaturänderungen in beide Richtungen ermöglichen, scheiden

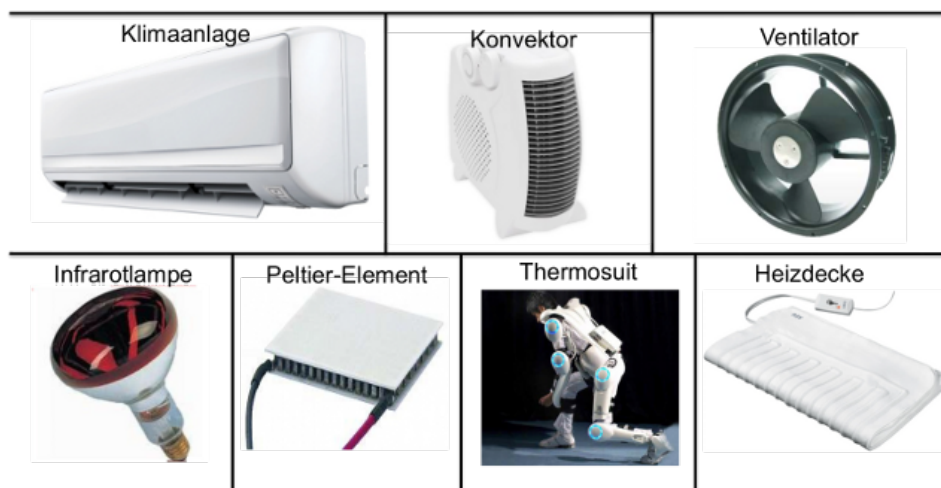


Abbildung 3.2.: Die verschiedenen Hardwarevorschläge nach [Dionisio, 1996], um die Temperatur zu verändern.



aber aufgrund der gleichen Nachteile aus. **Heizdecken** könnten direkt am Besucher befestigt werden und somit einen lokalen Wärmeeffekt erzeugen. Jedoch haben auch sie lange Reaktionszeiten, können keine Kälte erzeugen und würden die Bewegungsfreiheit einschränken. Die drei genannten Optionen eignen sich somit nicht für den Einsatz in virtuellen Welten.

Nach Dionisio gibt es vier Alternativen: Ventilatoren, Infrarotlampen, Peltierelemente und ein Thermosuit. Den **Thermosuit** (ein Anzug mit Kühl- und Heizmöglichkeit) schloss er damals auf Grund der hohen Kosten und der Einschränkung der Bewegungsfreiheit aus. Eine **Kombination aus Ventilatoren und Infrarotlampen** erscheint damals wie heute als eine praktikable Option. Daraus kann ein globales Display gebaut werden, das allen gewünschten Kriterien gerecht wird. Für lokale Anwendungen, eignen sich **Peltierelemente**, da sie klein sind und direkt am Benutzer angebracht werden können. Sie bestehen aus zwei Halbleitern mit unterschiedlichem Energieniveau. In Abhängigkeit der Richtung des Stromflusses kann damit eine Temperaturänderung erzeugt werden: In die eine Richtung kühlen Peltierelemente, bei umgekehrtem Stromfluss heizen sie. Diese Technik wird eingesetzt, wenn nur wenig Platz vorhanden ist, zum Beispiel in Kühlboxen. Im Kontext virtueller Welten können sie direkt auf der Haut angebracht werden.

Die Geräte wurden von [Dionisio, 1996] im Rahmen einer kleinen Studie evaluiert, indem er die Geräte überprüfte und in sieben Kategorien zwischen 0 und 2 Punkte vergab. Dabei ist 0 die minimale Punktzahl (existiert nicht, nicht möglich) und 2 die höchste (sehr gut, in vollem Umfang). Die Punkte wurden so gewählt, dass eine höhere Punktzahl in der jeweiligen Kategorie immer besser ist. So bedeutet beispielsweise eine 2 bei Finanzieller Aufwand, dass das Gerät sehr günstig ist und eine 0 würde hohe Anschaffungskosten bedeuten. Tabelle 3.1 präsentiert die Ergebnisse. Daraus geht hervor, dass Ventilatoren, Infrarotlampen und Peltierelemente in gleicher Weise empfohlen werden können. Ein Thermosuit ist aufgrund der Kosten nicht praktikabel, während die anderen Möglichkeiten aus technischer Sicht nicht geeignet sind.

### 3. VERWANDTE ARBEITEN

---

	Konstante Produktion	Echtzeit- fähigkeit	Mechanischer Aufwand	Finanzieller Aufwand	Kühl- leistung	Reich- weite	Globaler Effekt	SUMME
Klimaanlage	1	0	1	0	2	2	0	<b>6</b>
Konvektor	2	1	2	2	0	1	0	<b>8</b>
Ventilator	1	2	2	2	1	1	2	<b>11</b>
Infrarotlampe	2	2	2	2	0	2	1	<b>11</b>
Peltier	2	2	1	2	2	0	2	<b>11</b>
Thermosuit	2	1	0	0	2	0	2	<b>7</b>
Heizdecke	2	0	2	2	0	0	1	<b>7</b>

Tabelle 3.1.: Mögliche Hardware zur Erzeugung von Temperaturstimuli und ihre Bewertung nach Punkten [Dionisio, 1996]. 0 ist die minimale Punktzahl (existiert nicht, nicht möglich, sehr schlecht), wohingegen 2 die Höchstpunktzahl (sehr gut, in vollem Umfang) bedeutet.

## 3.2. Intelligente virtuelle Welten

Die Generierung virtueller Welten ist eine zeit- und kostenintensive Aufgabe. Eine Kombination von Methoden der Künstlichen Intelligenz mit virtuellen Welten kann Abhilfe schaffen. Ein Ansatz, weiteres Wissen in virtuellen Welten zu speichern, ist die Anreicherung von Objekten mit semantischen Informationen. Diese **Wissensrepräsentationen** können genutzt werden, um die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu vereinfachen [Wachsmuth et al., 1995]. In dem Projekt *CODY Virtual Constructor* wurden vier Wissenbasen vorgehalten, mit deren Hilfe zum Beispiel geometrische Informationen (“die Oberseite”) oder auch logische Repräsentationen (“das ist der Unterbau”) verarbeitet werden konnten. Die nötigen Beschreibungen waren dabei direkt mit einem geometrischen Objekt verknüpft. Wurde dieses Objekt in dem Szenario zum Aufbau eines anderen Objektes genutzt, konnten logische Beziehungen der einzelnen Objekte zueinander geschlossen werden [Jung und Wachsmuth, 1995].

Im Allgemeinen stellen semantisch angereicherte Objekte eine effiziente Möglichkeit zur Integration weiterer Eigenschaften in virtuellen Welten dar und werden oft als Intelligente Virtuelle Welten (IVEs<sup>6</sup>) bezeichnet [Luck und Aylett, 2000]. Nähere Informationen finden sich in Abschnitt 2.1.3.

Eine mögliche Art der Wissensrepräsentation stellen **semantische Netze** dar. Diese wurden erstmals von dem Sprachwissenschaftler Quillan in den 1960er Jahren vorge-

---

<sup>6</sup>aus dem Englischen: Intelligent Virtual Environments

schlagen [Quillan, 1966] und finden in der Informatik, im Besonderen in der künstlichen Intelligenz, eine breite Anwendung (vgl. z.B. [Charniak, 1985]). Semantische Netze werden durch einen verallgemeinerten Graphen repräsentiert, welcher im Gegensatz zum Szenengraph auch zyklische Verbindungen zulässt. Die Knoten eines solchen Netzes stellen dabei die Begrifflichkeiten (Konzepte) dar, während die Beziehungen durch die Kanten (Relationen) ausgedrückt werden. Durch semantische Netze lassen sich hierarchische Beziehungen zwischen verschiedenen Konzepten und deren Instanzen abbilden. Hierbei kommen Vererbungs- sowie Instanzrelationen (is-a und inst-of) zum Einsatz, die die **Klassifizierung** verschiedener Eigenschaften und Objekte ermöglichen. Die Vererbungsrelationen sind in der Regel transitiv, sodass alle Instanzen (oder auch Individuen) die Eigenschaften ihrer Klasse übernehmen.

2008 wurde die **SEARIS**<sup>7</sup>-Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die sich das Ziel gesetzt hat, ein gemeinsames Verständnis für die Entwicklung interaktiver Systeme zu schaffen. Dabei sollen verschiedene Ansätze verglichen werden, um daraus notwendige Methoden und Techniken zu entwickeln, die modular und portabel entworfen sind. Der Trend, “nur für das eigene System eine maßgeschneiderte Lösung zu entwickeln”, soll angehalten werden, und ein Repertoire an Funktionalitäten und Methoden erschaffen werden, das in Laboren auf der ganzen Welt eingesetzt werden kann. Im Idealfall sollte es ein Interface geben, das alle funktionalen Komponenten, die zur Entwicklung von interaktiven virtuellen Welten benötigt werden, verwaltet. Dazu gehört insbesondere auch die Ausgabe multisensorischer Stimuli, unabhängig von der konkreten Hard- und Software des jeweiligen Labors. [Wiebusch und Latoschik, 2012] stellen einen Ansatz vor, bei dem virtuelle Objekte mittels Ontologien semantisch annotiert werden. Unter einer Ontologie versteht man dabei die auf semantischen Netzen basierende, sprachlich formal geordnete Darstellung einer Menge von Begrifflichkeiten. Sie werden verwendet, um Wissen in digitaler Form (maschinenlesbar) auszutauschen und stellen logische Relationen bereit, die über eine reine Hierarchisierung hinausgehen. Anhand dieser Ontologien kann in dem Ansatz von [Wiebusch und Latoschik, 2012] eine Wissensrepräsentation erstellt werden, mit deren Hilfe automatisch Programmteile in einer vorgegebenen Zielsprache erstellt werden können.

---

<sup>7</sup>Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems

## 3.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verwandte Arbeiten betrachtet, die sich mit Teilaspekten der Generierung multisensorischer Stimuli befassen, um den aktuellen Stand der Forschung zu betrachten. Hierbei wurden relevante Punkte herausgearbeitet, welche sowohl die Umsetzung verschiedener Stimuli (Akustik, Wind und Wärme) selbst wie auch Möglichkeiten, diese in virtuelle Welten einzubetten, umfassen. Ausgehend von den Informationen, die in Kapitel 2 und in diesem Kapitel aufbereitet wurden, können nun die einleitend aufgestellten Fragen beantwortet werden (vgl. Abschnitt 1.2).

Die zunächst betrachtete **multisensorische Integration**, sowie die Arbeiten zu den einzelnen Ausgabekanälen bilden den Grundstein, um Teilziel 1 (die technische Integration von Ausgabemöglichkeiten, um die unterschiedlichen Sinne des Menschen anzusprechen) zu erreichen. Das folgende Kapitel 4 wird das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte System zur Generierung multisensorischer Stimuli vorstellen. Mit Rücksicht auf die gesetzten Anforderungen wurde die passende Hardware ausgewählt, um die zusätzliche Ausgabe von Wind und Wärme zu ermöglichen. In Kombination mit der bereits existierenden Hardware konnte ein System geschaffen werden, das die Generierung von Sound, taktilen Reizen, Wind und Wärme ermöglicht. Aufbauend auf den Ergebnissen der umfangreichen **Benutzerstudie** von [Dinh et al., 1999] kann später die durchgeführte Nutzerstudie entwickelt werden (siehe Kapitel 6). Dabei wurde die Frage beantwortet, ob die entwickelten multisensorischen Stimuli zu einer erhöhten Präsenz des Besuchers führen.

Abschließend wurden Methoden und Techniken vorgestellt, die eine einfache und intuitive Entwicklung von virtuellen Welten ermöglichen. Da multisensorische Stimuli aus der virtuellen Welt erzeugt werden, steigt der Arbeitsaufwand einer solchen Entwicklung deutlich an. Genau aus dem Grund wird in vielen aktuellen Projekten auf die Integration mehrerer Ausgabekanäle verzichtet. Um das entwickelte System nutzbar zu machen, wird in Kapitel 5 ein Softwareframework vorgestellt, mit dessen Hilfe der Entwicklungsaufwand gering gehalten werden kann.

# TECHNISCHE INTEGRATION MULTISENSORISCHER STIMULI

Im Rahmen dieses Dissertationsprojektes wurde ein System entwickelt, das, ausgehend von dem VR-System der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme, multisensorische Ausgaben ermöglicht. Die dafür umgesetzten Erweiterungen bestehen aus einer verbesserten Soundausgabe, der Integration einer Physikengine mit Feedback über taktile Reize, einem Windsystem und einer Wärmeintegration. Ausgehend von den Sinnen des Menschen (Kapitel 2) und den vorgestellten verwandten Arbeiten (Kapitel 3), beschreibt dieses Kapitel die Integration der für dieses System notwendigen Technik. Zu Beginn werden allgemeine Anforderungen für mögliche Anbindungen aufgestellt, um Anhaltspunkte für das Konzept des Systems zu erhalten. Dabei werden die Ziele dieser Arbeit und die Ansprüche von Projekten im Kontext der Arbeitsgruppe berücksichtigt. Im Anschluss wird die konkrete Umsetzung der einzelnen Teilsysteme beschrieben und mit den gesetzten Zielen und Anforderungen verglichen. Ergebnisse von technischen Evaluationen, die im Entwicklungsprozess durchgeführt wurden, um ein zufriedenstellendes Gesamtsystem zu gewährleisten, belegen die Leistungsfähigkeit.

Teile dieser Arbeiten sind in [Fröhlich und Wachsmuth, 2011a], [Fröhlich und Wachsmuth, 2013a], [Hülsmann et al., 2014] und [Fröhlich und Wachsmuth, 2014] veröffentlicht.

### 4.1. Arbeitsumgebung ohne multisensorische Ausgaben

Im Labor für Künstliche Intelligenz und Virtuelle Realität der AG WBS, unter der Leitung von Prof. Dr. Ipke Wachsmuth, wurde im Jahr 2001 ein VR-System installiert (skizziert in Abbildung 4.1). Es besteht aus einer CAVE mit drei Projektionsflächen (Boden, Front, linke Seite) zur grafischen Darstellung virtueller Welten. Eine stereoskopische Wiedergabe wird durch polarisiertes Licht realisiert. Ein ART-Trackingsystem mit 11 Infrarot-Kameras ist rund um den Interaktionsraum angebracht und ermöglicht eine markerbasierte Interaktion und Navigation sowohl mit aktiven wie auch passiven Markern. Die Kameras decken den genutzten Raum komplett ab, ein stetiges Tracking ohne Unterbrechungen ist gewährleistet. Zur Soundausgabe wurden in den acht Ecken Lautsprecher sowie unter der Bodenprojektionsplatte drei Subwoofer angebracht.

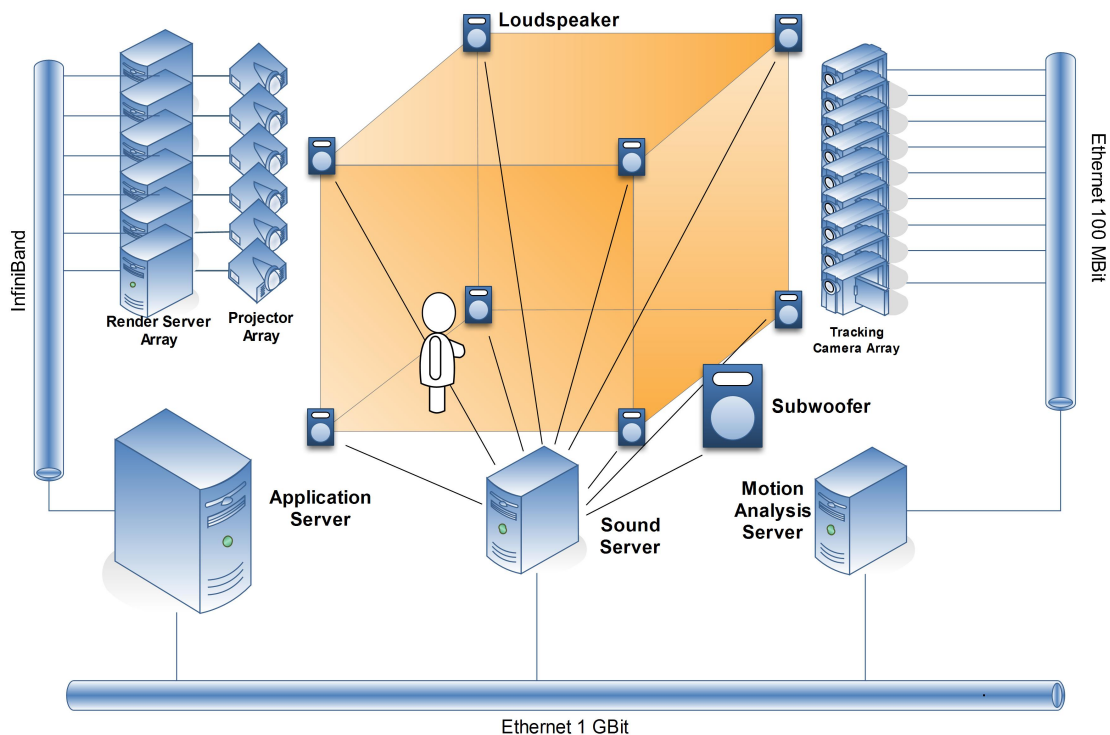


Abbildung 4.1.: Technische Infrastruktur der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme (Stand 2008), ohne multisensorische Ausgaben.

Softwareseitig wird in der AG WBS seit 2009 das ***InstantReality-Framework*** eingesetzt [Fellner et al., 2009]. Es wurde vom Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) und dem Zentrum für Foren in der grafischen Datenverarbeitung e.V. (ZGDV) entwickelt, um ein einfaches und konsistentes Werkzeug für AR- und VR-Entwickler bereitzustellen. Es bietet eine konsistente und plattformunabhängige Schnittstelle, mit der virtuelle Welten im Extensible-3D-Format (X3D) beschrieben werden können. X3D ist eine Beschreibungssprache für 3D-Modelle und wurde im Jahr 2001 offizieller Standard für die 3D-Webentwicklungen. Die Szene wird dabei in einer hierarchischen Graph-Struktur (Szenengraph) repräsentiert. Neben vielen vorgegebenen Knoten können eigene Funktionalitäten durch sogenannte Prototypen eingebunden werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, mithilfe von Java und Javascript extern auf die Szenengraphstruktur zuzugreifen. Mithilfe der *InstantIO*-Schnittstelle können zudem sehr einfach externe Geräte eingebunden werden.

## 4.2. Anforderungen

Um konkrete Anforderungen für die Anbindung von Ausgabemodalitäten aufzustellen, müssen zunächst die gesetzten Ziele berücksichtigt werden. Relevant sind dabei die Anforderungen von Teilziel 1 (siehe Abschnitt 1.2):

**Teilziel 1** Um die unterschiedlichen Sinne des Menschen anzusprechen, sollen entsprechende Ausgabemöglichkeiten technisch integriert werden. Das resultierende System soll folgende Anforderungen erfüllen:

**Effizienz** Die Ausgabe der Stimuli soll in Echtzeit erfolgen und mit wenigen zusätzlichen Rechenressourcen auskommen.

**Natürlichkeit** Die generierten Ausgaben sollen möglichst natürlich sein und wahrnehmungsphysiologischen Erkenntnissen entsprechen.

**Vollständigkeit** Die Ausgaben sollen ein möglichst umfassendes Spektrum an real auftretenden Phänomenen abdecken.

Muss neue Hardware installiert werden, ist es zudem wichtig, auf die Sicherheit und Kosteneffizienz zu achten. Die Sicherheit bezieht sich dabei auf den Besucher, den Entwickler und die Gesamtstabilität. Zusätzlich dürfen neu hinzukommende Komponenten

die schon existierenden nicht beeinflussen. Die Interaktivität und damit Echtzeitfähigkeit des Systems muss weiterhin erfüllt sein. Eine schnelle Reaktionszeit der genutzten Hardware ist entscheidend, sowohl auf Handlungen des Besuchers wie auch auf eine Positionsänderung (virtuell wie real) muss schnell reagiert werden, um keinen Bruch der Präsenz auszulösen. Die Bewegungsfreiheit sollte möglichst wenig eingeschränkt werden. Zudem sollen die Anschaffungs- und Installationskosten möglichst gering gehalten werden. Je nach Stimulus können noch spezifische Anforderungen hinzukommen. Zusammenfassend lassen sich folgende Punkte als allgemeine Anforderungen an neue Hardware-Komponenten festhalten:

- **Sicherheit** von Besuchern und Entwicklern
- Sicherheit des technischen Equipments
- **Echtzeitfähigkeit** muss gewährleistet werden, also schnelle Reaktionszeiten der technischen Geräte und Berechnungen der Ausgaben in Echtzeit
- Kontinuierliche Anpassungen sollen möglich sein, ansonsten diskrete Ausgaben mit ausreichend vielen Zwischenstufen
- **Anschaffungs- und Installationskosten** sollen möglichst gering sein
- Vorhandene **Kapazitäten** sollen auch für zusätzliche Berechnungen ausreichen

### 4.3. Das Soundsystem

Eine zufriedenstellende Soundausgabe wird erreicht, wenn der Besucher das Gehörte als realistisch empfindet. Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, muss dafür nicht unbedingt eine physikalisch korrekte Berechnung der akustischen Ausgabe erfolgen, sondern auch hinreichend gute Approximationen können eingesetzt werden. Im Folgenden wird zunächst das Konzept eines Soundsystems vorgestellt, gefolgt von einem konkreten Realisierungsvorschlag. Anschließend wird das implementierte System erläutert. Schließlich werden die Ergebnisse betrachtet.



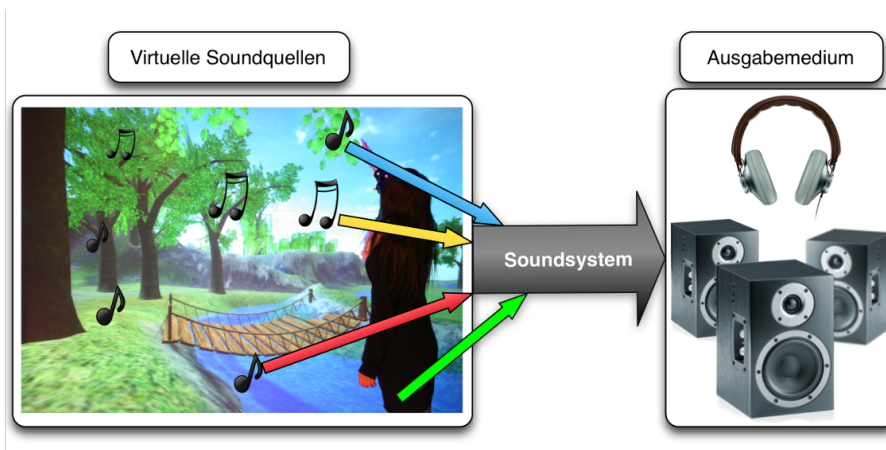


Abbildung 4.2.: Veranschaulichung der Aufgabe eines Soundsystems: die Umwandlung von virtuellen Soundquellen in eine akustische Ausgabe.

### 4.3.1. Konzeption

Um eine akustische Ausgabe zu erzeugen, müssen virtuelle Soundquellen auf ein Ausgabemedium übertragen werden (illustriert in Abbildung 4.2). Die Aufgabe eines Soundsystems ist es somit, verschiedene virtuelle Soundquellen in eine konkrete Ausgabe umzuwandeln. Solche Soundquellen müssen bestimmte Eigenschaften haben, die für die Berechnung wichtig sind. Angelehnt an das Beleuchtungsmodell von [Phong, 1975] (vgl. Abschnitt 2.2.1), wird eine Dreiteilung der akustischen Ausgabe postuliert.

**Ambiente Klänge** Ähnlich wie die Beleuchtung verfügen ambiente Klänge über ein Grundniveau, welches über weite Teile einer Szene mehr oder weniger konstant bleibt. Ambiente Klänge (auch "Atmo" genannt) werden bereits von Klang-Ingenieuren, beispielsweise in der Film-Branche, erfolgreich eingesetzt und stehen grundsätzlich in großer Anzahl zur Verfügung. Sie werden für größere, aber abgeschlossene Bereiche der virtuellen Welt definiert, zum Beispiel für eine virtuelle Stadt, oder Teilbereiche, wie ein Einkaufszentrum innerhalb der Stadt. Solange sich der Besucher innerhalb des definierten Bereiches befindet, wird der Klang ohne eine dedizierte Richtung und immer in der gleichen Lautstärke abgespielt. Es kann außerdem immer nur ein ambienter Klang aktiv sein. Dies heißt im Umkehrschluss, dass alle anderen ambienten Sounds ausgeblendet werden, solange sich der Besucher nicht in den entsprechenden Bereichen der virtuellen Umgebung aufhält.

Zusätzlich können durch dieses Verfahren Umgebungsparameter definiert werden, wel-

che Einfluss auf das Audio-Rendering haben. Hierdurch sollen Effekte erzielt werden, die eine bestimmte Umgebung, wie zum Beispiel ein Außenszenario, eine Konzerthalle oder eine Höhle, simulieren.

**Statische Klänge** Zu einer realistischen Simulation gehören zusätzlich positionsabhängige Ausgaben, für die in Abhängigkeit von der Nutzerposition in jedem Zeitschritt eine Ausgabe berechnet werden muss. Um diese abzuspielen, müssen folgende Informationen bekannt sein:

- Eine **Audiodatei**, die abgespielt werden soll.
- Die **Position** in der virtuellen Welt. Bei direkter Kopplung mit einem virtuellen Objekt wird dessen Position benötigt, um eine feste Bindung der beiden Bestandteile herzustellen. So soll sich bei etwaiger Objektbewegung auch der Sound mitbewegen.
- Die **Lautstärke**, die der Besucherposition angepasst werden muss. Nach [Begault, 1994] entspricht eine Verdopplung der Entfernung einer Verringerung der Lautstärke um 6 dB.
- Der **Wiedergabemodus** ermöglicht es, Soundfiles in Endlosschleife abzuspielen oder eine zeitlich gesteuerte Wiederholfrequenz anzugeben. Mögliche Modi sind: Konstante Ausgabe, zum Beispiel das von einem Wasserfall emittierte Rauschen, zufällig wiederholende Ausgaben, wie das Zwitschern von Vögeln, und regelmäßig wiederholende Sounds, zum Beispiel von einer Kirchturmuh.

**Ereignis-Klänge** (Event-Sounds) Bestimmte Ausgaben erfolgen nur durch Ereignisse, die nicht immer vorhergesagt werden können. Falls eine Physikanbindung vorhanden ist, gehören dazu insbesondere passende akustische Ausgaben, wenn sich beispielsweise Objekte bewegen (siehe Kapitel 4.4). Meistens handelt es sich dabei um kurze, einmalige Vorkommnisse (u.a. ein Ball fällt auf den Boden oder ein Schlägel trifft einen Gong). [Bormann, 2008]) zuzufolge ist es wichtig, dass optischer und akustischer Eindruck stets zusammenpassen, da sonst ein Bruch der Immersion entsteht. Um dies zu gewährleisten, müssen entsprechende Berechnungen zur Bestimmung des angemessenen Sounds effizient durchgeführt werden.

Zu den Events zählen auch Schrittgeräusche, die durch den Besucher in der virtuellen Welt verursacht werden. Da diese zusätzliche Bewegungsinformationen vermitteln, sollte jeder Schritt als separater Sound abgespielt werden. Nach [Sikström, 2009] ist es nicht nur wichtig, unterschiedliche Sounds für verschiedene Bodenbeschaffenheiten bereitzuhalten, sondern auch möglichst viele Variationen von Schrittgeräuschen auf dem entsprechenden Untergrund. Bei jedem virtuellen Schritt sollte dann zufällig eine dieser Dateien ausgewählt und abgespielt werden.

### 4.3.2. Realisierung

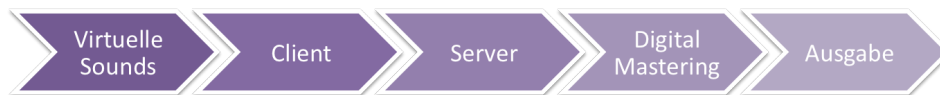


Abbildung 4.3.: Realisierungsvorschlag für eine akustische Ausgabe. Die virtuellen Soundquellen werden von einem Client verarbeitet und an den Server weitergeleitet. Dieser bestimmt die Aktivierungswerte für jede hörbare Soundquelle. Nach dem “Digital Mastering” wird abschließend die Ausgabe abgespielt.

Zur Umsetzung des Konzepts bietet sich eine Client-Server-Struktur an (siehe Abbildung 4.3). Der Client soll dabei die Aufgabe übernehmen, die einzelnen Soundquellen zu sammeln und zu überwachen, ob es Änderungen gibt. Informationen, die die Klangausgabe ändern, werden an den Server weitergeleitet. Es sollte eine robuste Netzwerkverbindung gewählt werden, mit Hilfe eines verlustfreien und gleichzeitig schnellen Protokolls, um den Anforderungen der Echtzeit-Soundausgabe gerecht zu werden. Zeitintensive Daten- sowie Zugriffssicherungen sollten dabei vermieden werden.

Der Server nimmt die Daten in Empfang und berechnet aus den Informationen für jede Soundquelle die aktuelle Ausgabe. Er übernimmt dabei die Aufgabe zu überprüfen, dass nur ein ambienter Sound aktiv ist; sollte ein neuer gestartet werden, wird der vorherige beendet. Um keinen zu harten Übergang zu erzeugen, werden die beiden Sounds dabei ineinander übergeblendet. Zusätzlich stellt der Server die Verbindung zum eigentlichen Audio-Rendering her, bei dem aus den vielen einzelnen Soundquellen ein gesamtes Klangbild berechnet wird (vgl. “Digital Mastering” in Abschnitt 3.1.1).

Abschließend erfolgt eine Ansteuerung des Ausgabemediums durch den Server und somit die Wiedergabe der berechneten akustischen Ausgabe auf dem gewünschten Ausgabemedium.

### 4.3.3. Implementierung

Das zu entwickelnde Soundsystem sollte ohne weitere Hardware-Kosten realisiert werden und mit den vorhandenen acht Lautsprechern sowie zwei Subwoofern auskommen. Die erste Implementierung eines dem Realisierungsvorschlag entsprechenden Client-Server-Modells erfolgte durch [Dankert, 2010]. Abbildung 4.4 verdeutlicht die gewählten Komponenten.

Die Entwicklung der virtuellen Welten erfolgt hier in X3D mit *InstantReality*. Zunächst werden virtuelle Soundquellen erzeugt, indem ein `<SoundNode>` innerhalb der X3D-Umgebung definiert wird. Knoten erhalten ihre Funktionalität über die Werte in ihren Feldern. Für einen `<SoundNode>` stehen die Felder gemäß Tabelle 4.1 zur Verfü-

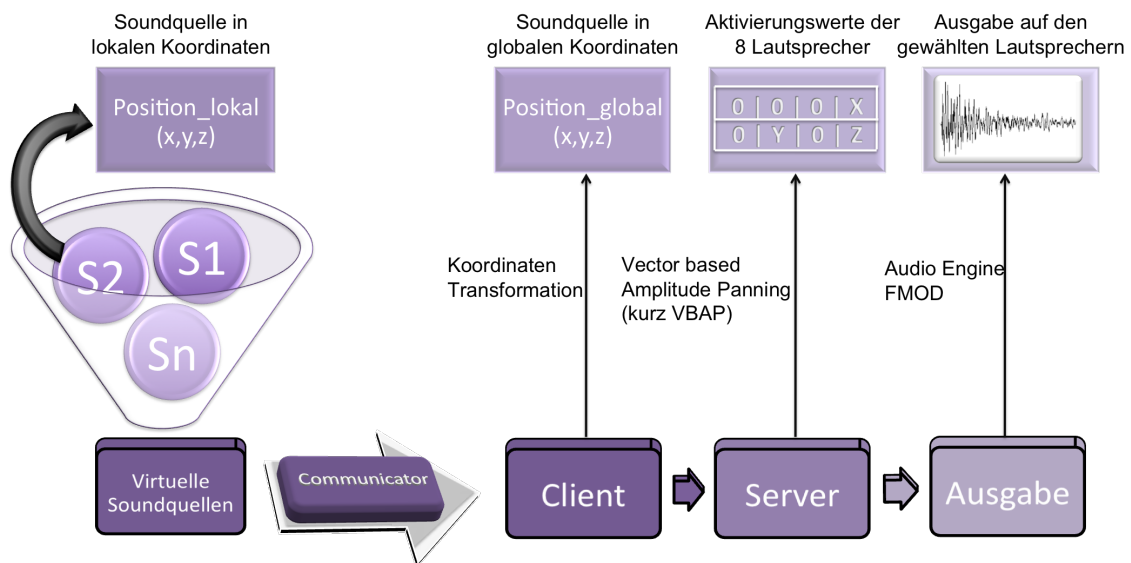


Abbildung 4.4.: Übersicht der Implementierung einer akustischen Ausgabe. Ausgehend von den virtuellen Soundquellen wird mithilfe einer Client-Server-Architektur die Ausgabe generiert. Eine detaillierte Beschreibung der Abläufe findet sich im Text.

#	Name	Datentyp	Typ	Defaultwert	Beschreibung
1	file	SFString	initializeOnly	UnsetSoundFile.wav	Pfad zur abzuspielenden Datei
2	ambient	SFBool	initializeOnly	false	Flag, um ambiente Sounds zu markieren
3	loop	SFBool	initializeOnly	false	Flag, um Endlosschleife an-/abzuschalten
4	directStart	SFBool	initializeOnly	false	Flag, um Sound direkt mit Programmstart zu aktivieren
5	start	SFBool	inputOnly		Spielt Datei von Anfang an ab
6	stop	SFBool	inputOnly		Stoppt aktuelle Wiedergabe
7	togglePlayPause	SFBool	inputOnly		Pausiert oder stoppt aktuelle Pausierung
8	terminate	SFBool	inputOnly		Beendet aktuelle Wiedergabe (Soundknoten wird gelöscht)
9	frequency	SFInt32	inputOutput		Setzt die Frequenz in Hz
10	volume	SFFloat	inputOutput	1	Setzt die Lautstärke im Intervall [0..1]
11	id	SFInt32	outputOnly		Vom Server verteilte ID
12	isPaused	SFBool	outputOnly		Gibt an, ob die Wiedergabe pausiert ist

Tabelle 4.1.: Implementierte Felder für einen `<Soundnode>`. Felder 1-4 sind die Initialisierungsfelder, Felder 5-10 ermöglichen die Funktionen der statischen Soundquellen und Felder 11 sowie 12 dienen der eindeutigen Identifikation.

gung. Der erste Block (Felder 1-4) gibt die wichtigen Initialisierungsfelder an, auch als Basiseigenschaften jeder Soundquelle zu verstehen. Für den Fall, dass es sich um einen statischen Sound handelt, der direkt an ein virtuelles Objekt gekoppelt ist, sind insbesondere die Felder 5-10 von Bedeutung. Diese Art von Soundquellen kann beispielsweise an- und ausgeschaltet werden. Die Felder 11 und 12 werden serverseitig befüllt und dienen allein der Identifikation.

Es ist die Aufgabe des Programmierers, diese Soundknoten in der virtuellen Welt anzulegen und entsprechend seiner Vorstellung die Felder zu befüllen. Listing 4.1 zeigt einen exemplarischen Soundknoten, für einen virtuellen Fön. Wichtig ist dabei, dass es sich nicht um einen ambienten Sound handelt (siehe Zeile 3), sondern dass der Sound direkt mit dem graphischen Objekt Fön verbunden wird. Außerdem wird die entsprechende Datei nicht direkt abgespielt, sondern muss an anderer Stelle noch mit dem Einschalten des Föns verbunden werden. Zu Beginn ist somit das Feld `directStart = false` zu setzen.

#### 4. TECHNISCHE INTEGRATION MULTISENSORISCHER STIMULI

---

Listing 4.1: Beispiel für einen eingebundenen <Soundnode> anhand eines nicht ambienten Sounds (Zeile 3).

```
1 <SoundNode DEF="hairdryer_soundnode "  
2 file="/vol/kilabor/data/sounds/hairdryer_sound.mp3 "  
3 ambient="false "  
4 loop="true "  
5 directStart="false "  
6 volume="1.0 "  
7 />
```

Da die Client-Server-Struktur in Java implementiert ist, wird ein **Communicator** benötigt, um die Daten von jedem <SoundNode> aus X3D für den Java-Client zu übersetzen. Alle angelegten Soundknoten werden von dem **Client** verwaltet, der überwacht, ob es Änderungen gibt. Er übernimmt auch die Aufgabe der Koordinatensystemtransformation, um die Soundknoten von ihren lokalen Koordinaten in globale Weltkoordinaten zu transferieren. Dies ermöglicht an späterer Stelle eine schnellere Ausgabe, da die Koordinaten bereits in dem passenden Referenzsystem gespeichert sind. Gibt es Änderungen, die die Soundausgabe beeinflussen, sendet der Client diese Daten an den Server. Die Verbindung erfolgt dabei mittels User Datagram Protocol (UDP), einem minimalen, verbindungslosen Netzwerkprotokoll.

Der **Server** ist in Java implementiert und nimmt die Daten des Clients über das Netzwerk in Empfang. Die empfangenen Daten werden eingelesen und entsprechende Aktionen an die Ausgabe weitergeleitet:

- **Neuer Sound:** Nachdem die zugehörige Datei und Position verarbeitet wurden, werden die Informationen an die Ausgabe weitergegeben.
- **Update Sound:** Ein bestehender Soundknoten erfährt eine Änderung. Dabei kann es sich beispielsweise um benutzergesteuerte Aktionen, wie An- und Ausschalten, handeln.
- **Update der Benutzerposition:** Jedes Mal, wenn sich der Besucher bewegt werden die richtungsabhängigen Ausgaben entsprechend angepasst.
- **Programm Ende:** Der Client wurde beendet und alle zugehörigen Soundknoten werden gelöscht.

Für jeden Knoten muss berechnet werden, auf welchen Lautsprechern er ausgegeben wird. Die Installation, mit acht Lautsprechern in den Ecken des Interaktionswürfels, eignet sich nicht für eine Wellenfeldsynthese (siehe Abschnitt 2.2.2). Deswegen wurde eine Wiedergabe mittels *Vector-based Amplitude Panning* (VBAP) implementiert, wie erstmals 1997 von [Pulkki, 1997] vorgestellt, veranschaulicht dargestellt in Abbildung 4.5. Diese Berechnung obliegt dem Server.

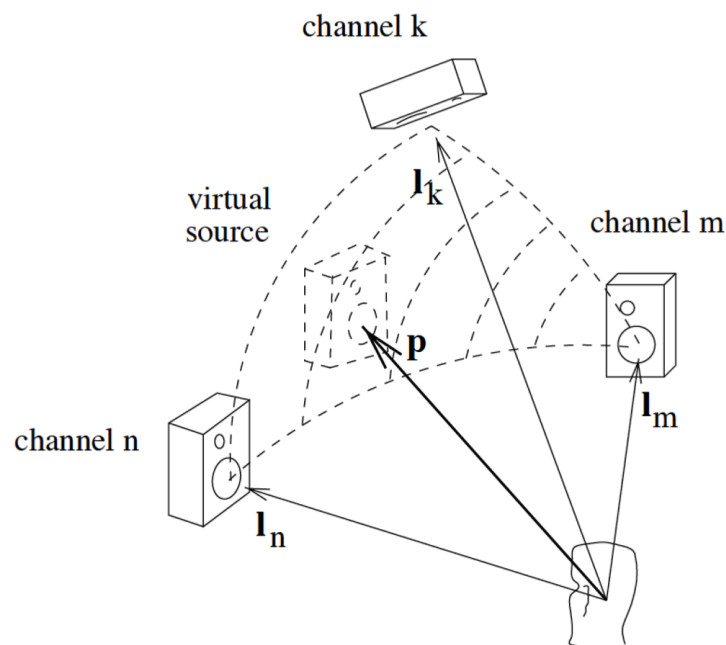


Abbildung 4.5.: Auswahl der geeigneten Lautsprechertripel mittels Vector-based Amplitude Panning (nach [Pulkki, 1997]).

Jede nicht ambiente Soundquelle hat eine Richtung (Vektor  $\mathbf{p}$ ), die als linear gewichtete Summe der Lautsprechervektoren verstanden wird:

$$\mathbf{p} = g_m \mathbf{l}_m + g_n \mathbf{l}_n + g_k \mathbf{l}_k \quad (4.1)$$

Dabei stehen  $g_m$ ,  $g_n$  und  $g_k$  für die Verstärkungsfaktoren der jeweiligen Lautsprecher und werden später in Lautstärke umgesetzt. Im Rahmen dieses Verfahrens dürfen nur drei Lautsprecher für eine Soundquelle ausgewählt werden. Falls die Berechnung gemäß Formel 4.1 mehr als drei Lautsprecher ergibt, muss ein Tripel ausgewählt werden. Die Berechnung der Tripel kann nicht zur Laufzeit erfolgen, sondern muss als Voraussetzung für jede Installation im Rahmen einer Triangulierung vorab erfolgen. Für die

Installation der AG WBS konnten zwölf sinnvolle Lautsprechertripel identifiziert werden, die in einer separaten Datei vorgehalten sind. Das am besten geeignete Tripel wird daraus anhand der gewichteten Gesamtsumme bestimmt und die Gewichte der einzelnen Ausgaben anschließend entsprechend normiert.

Abschließend steht eine Liste bereit, die die Aktivierung der acht Lautsprecher für jede virtuelle Soundquelle enthält. Um eine akustische Ausgabe zu erzeugen, muss daraus ein einheitliches Gesamtklangbild errechnet werden. Dafür stehen verschiedene Audiobibliotheken bereit, die diesen Prozess übernehmen (siehe Abschnitt 3.1.1). In der AG WBS wird dafür die FMOD-Middleware eingesetzt. Sie bekommt die Daten des Servers und steuert im Anschluss die Lautsprecher an.

### 4.3.4. Zusammenfassung

Das Soundsystem ermöglicht eine natürliche akustische Ausgabe. Die Wahl des Vector-based Amplitude Pannings ermöglicht die Balance zwischen Natürlichkeit und Effizienz. Durch das entwickelte Konzept einer Dreiteilung (ambient, statisch, ereignisbezogen) der akustischen Ausgaben können viele natürlich auftretende Phänomene simuliert werden. Um allerdings eine wirkliche Natürlichkeit und Vollständigkeit zu erzielen, muss auf eine physikalisch korrekte Berechnung zurückgegriffen werden. Entsprechende Grundlagen und Beispiele wurden bereits in den Abschnitten 2.2.2 und 3.1.1 vorgestellt. Das hier gewählte Verfahren bietet aber die Vorteile der gesicherten Echtzeitfähigkeit und Kosteneffizienz.

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit erfolgte zusätzlich eine technische Evaluation. Abbildung 4.6 präsentiert die Ergebnisse. Die in Blau dargestellte Geschwindigkeit (in *frames per second*<sup>1</sup>) belegt, dass es auf Grund der effizienten Berechnungen zu keinen Einbußen der Echtzeitfähigkeit kommt. Da alle Dateien zu Beginn geladen werden müssen, verlängert sich die Ladezeit allerdings deutlich (in Gelb dargestellt).

---

<sup>1</sup>Anzahl der Einzelbilder pro Sekunde



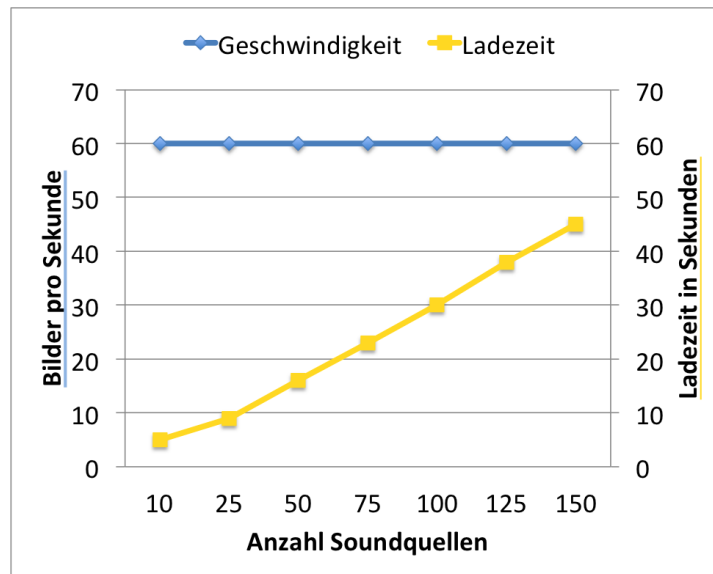


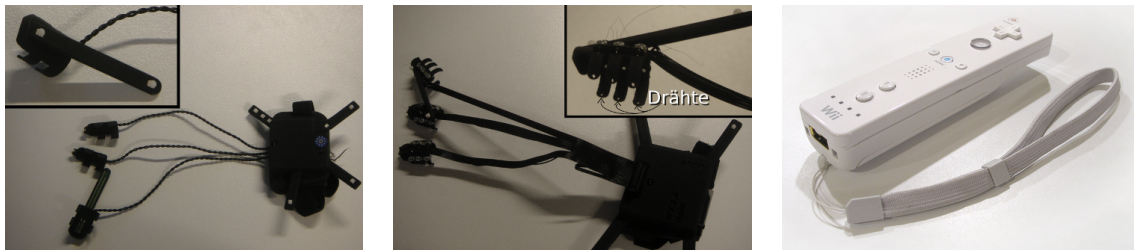
Abbildung 4.6.: Ergebnisse der technischen Evaluation des Soundservers. Mehr eingefügte Soundquellen haben keine Auswirkung auf die Geschwindigkeit der Anwendung (in Blau), führen aber zu einer erhöhten Ladezeit (in Gelb).

## 4.4. Physikalische Interaktion mit taktilen Stimuli

Neben der visuellen und akustischen Ausgabe gehört die Erweiterung um haptische Ausgaben (insbesondere taktil) zu den häufigsten in VR-Systemen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Nachdem eine akustische Ausgabe integriert worden war, sollten taktile Reize einbezogen werden. Daran anknüpfend wurde eine physikalische Berechnung integriert.

### 4.4.1. Hardware

Taktiler Feedback ist in CAVE-Umgebungen nur begrenzt möglich, ohne den Besucher stark einzuschränken. Wie in Kapitel 2.2.3 dargelegt, sollte auf große Geräte (wie zum Beispiel ein PHANTOM-Arm [Massie und Salisbury, 1994]) verzichtet werden, um die Bewegungsfreiheit zu erhalten. Die in der AG WBS bereits vorhandenen Geräte besitzen teilweise die Möglichkeit, taktile Stimuli zu erzeugen, und sollen im Folgenden vorgestellt werden:



(a) ART Datenhandschuhe ohne Feedback. (b) ART Datenhandschuhe mit Feedback. (c) Nintendo WiiRemote.

Abbildung 4.7.: Eingabegeräte der AG WBS

- **Datenhandschuhe ohne Feedback** (Abbildung 4.7(a)) der Firma ART als Baukastensystem. Die Handschuhe funktionieren aktiv und bestehen als Basis aus einer Box, die am Handrücken befestigt wird. In dieser Box gibt es Anschlüsse für Fingertargets, mit deren Hilfe eine komplette Rekonstruktion der Handform berechnet werden kann. Die Fingersätze gibt es in drei verschiedenen Größen und sowohl als 3-Finger<sup>2</sup>- wie auch 5-Finger-Variante. Sie können zeitgleich an beiden Händen getragen werden.
- **Datenhandschuhe mit Feedback** (Abbildung 4.7(b)) besitzen dieselbe Basis wie die Handschuhe ohne Feedback. Die entsprechenden Fingersätze gibt es nur in einer 3-Finger-Variante. An den Fingerspitzen sind jeweils drei kleine Drähte angebracht, welche sich durch Erwärmung verkürzen. Erfolgen diese Verkürzungen in kurzen Abständen, entsteht eine Vibration, die als taktiles Feedback wahrgenommen wird. Die Drähte bestehen aus *Memorymetall*, welches sich nach einer Verformung immer wieder in seine ursprüngliche Form zurück bewegt. Die drei Drähte lassen sich einzeln ansteuern, und die Stärke der Vibration kann stufenlos geregelt werden.
- Die **Nintendo WiiRemote** (Abbildung 4.7(c)), ursprünglich als Eingabegerät für eine Spielekonsole entwickelt, ist ein weit verbreitetes Eingabegerät in virtuellen Welten. Sie zeichnet sich durch geringe Anschaffungskosten und eine einfache Handhabung aus. Die erste Verwendung in der AG WBS erfolgte durch [Hammerl et al., 2007], im Laufe der Jahre wurden darauf aufbauend viele verschiedene Interaktionsmethoden mit der WiiRemote entwickelt. Ein Vorteil ist, dass sie auch von

---

<sup>2</sup>Daumen, Zeige- und Mittelfinger

mehreren Besuchern genutzt werden kann, ohne jedes Mal neu kalibriert werden zu müssen. Die eingebaute Rumble<sup>3</sup>-Funktion kann als Feedback genutzt werden, ist jedoch nicht in Stärke und Ausbreitung regulierbar.

Im Rahmen seiner Bachelorarbeit entwickelte [Renner, 2011] eine Anbindung der Hardware an das System der AG WBS. Dabei wurden ein intuitives Interaktionsverfahren und physikalische Berechnungen der Reaktionen inkludiert.

#### 4.4.2. Konzeption

Um eine natürliche Interaktion zu ermöglichen, muss ein entsprechendes System zum einen Benutzereingaben erfassen und zum anderen eine angemessene Ausgabe berechnen. Dazu gehört sowohl eine realistische graphische Reaktion auf die Eingabe als auch die Generierung von taktilen Feedback. Abbildung 4.8 verdeutlicht diese Aufgabe. Es müssen die drei Teilaspekte (1) intuitive Interaktionsmöglichkeit, (2) taktilen Feedback bei Berührung und (3) realistische Reaktion auf Manipulationen erfüllt werden.

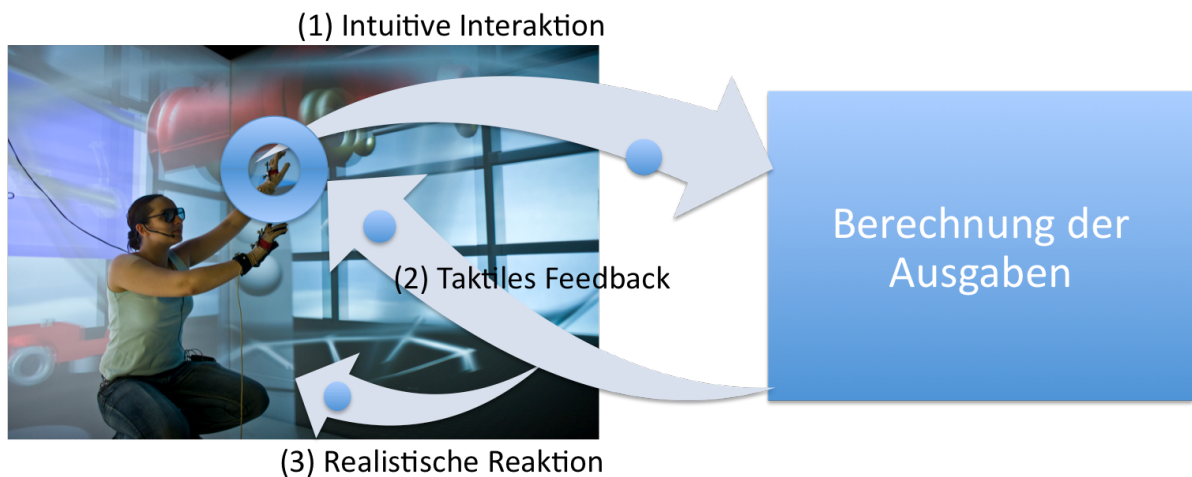


Abbildung 4.8.: Illustration der drei Aufgaben zur Bereitstellung einer natürlichen Interaktion.

**Intuitive Interaktionsmöglichkeiten**, wie von [Latoschik, 2001] vorgestellt, erfolgen über Datenhandschuhe in Kombination mit einer gestenbasierten Interaktion. Ein großer Vorteil ist dabei, dass der Besucher auf Wissen aus der realen Welt zurückgreifen kann und somit die Trainingsphase gering ist.

<sup>3</sup>engl. für rumpeln, poltern

Eine **realistische Reaktion** der Umgebung auf Eingaben wird durch die Berechnung von physikalisch korrekten Reaktionen realisiert. Dabei müssen die Schwerkraft, Objekt-Objekt-Kollisionen und Besucher-Objekt-Kollisionen simuliert werden. Objekteigenschaften, welche Einfluss auf die Reaktionen haben, sollten am Objekt gespeichert werden können, um unterschiedliche Szenarien zu simulieren. Da physikalische Berechnungen hinsichtlich der benötigten Rechenzeit kostspielig sind, müssen entsprechende Einschränkungen berücksichtigt werden. Eine Unterteilung der virtuellen Objekte in statische (unbewegliche) und dynamische (bewegliche) Objekte ist sinnvoll, um die Anzahl der Berechnungen zu minimieren.

Besucher-Objekt-Kollisionen bilden den Anlass, **taktile Stimuli** zu generieren. Feedback wird zum Beispiel ausgelöst, wenn der Besucher mit seinen Fingern die Oberfläche eines virtuellen Objektes berührt. Das generierte Feedback soll für verschiedene Objekte unterschiedlich stark sein und die Funktionalität des Eingabegeräts maximal ausschöpfen.

### 4.4.3. Realisierung

Zur Realisierung bietet sich eine Unterteilung in Module an, die möglichst unabhängig und austauschbar gehalten werden sollten. So ist es möglich, bei Bedarf nur Teile der Funktionalität einzubinden oder später auszutauschen.

Abbildung 4.9 veranschaulicht die Aufteilung. Das zentrale Modul ist das **Interaktionsmodul**, das die Handlungen der Besucher detektiert und eine Besucher-Objekt-Kollisionsberechnung durchführt. Dazu gehört die Anbindung (und Auswahl) eines geeigneten Eingabegeräts, mit dessen Hilfe der Besucher mit der virtuellen Welt interagieren kann. Bei aktiviertem taktilen Feedback erfolgt eine direkte Rückkopplung, indem ein passender taktiler Reiz generiert wird, wenn der Besucher ein virtuelles Objekt berührt. Eine taktile Ausgabe erfolgt im Optimalfall mit einer Modulation der Stärke und Eintauchtiefe.

Weiterhin ist das Interaktionsmodul die Schnittstelle zur **physikalischen Berechnung**, das realistische graphische Ausgaben generiert. Physik-Engines (vgl. Abschnitt 3.1.2), die am Markt sowohl kommerziell wie auch frei verfügbar sind, erfüllen alle gewünschten Anforderungen. So können dynamische Objekte, welche den Gesetzen der Schwerkraft unterliegen, von dem Besucher bewegt werden. Statische Objekte werden auch zur Kollisionsberechnung herangezogen, sind selber aber unbeweglich. Zu den Mate-

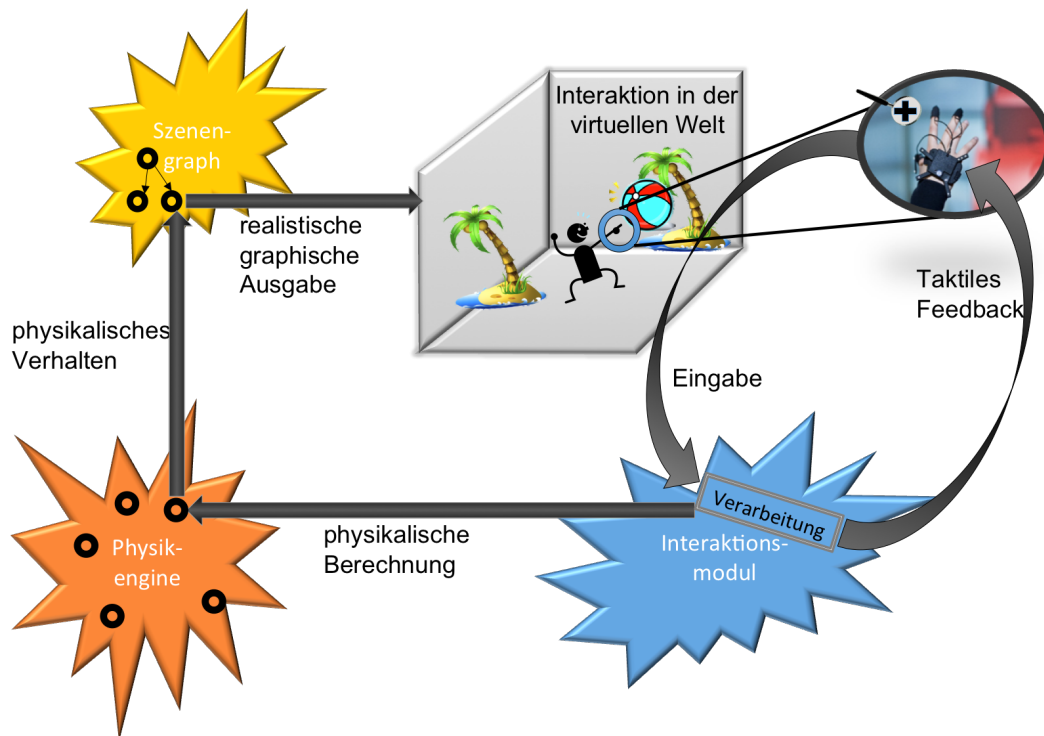


Abbildung 4.9.: Realisierungsvorschlag, um natürliche Interaktion zu ermöglichen. Das Interaktionsmodul verarbeitet die Eingaben und hat eine direkte Rückkopplung über taktiles Feedback. Relevante Objektkollisionen werden an die Physik-Engine weitergegeben. Über die Objektrepräsentation im Szenengraph kann eine realistische graphische Ausgabe generiert werden.

raleigenschaften für jedes Objekt gehören Masse, Dichte, Reibungskoeffizient und Luftwiderstand. Außerdem sollte die Hand des Besuchers als physikalisches Objekt in der virtuellen Welt repräsentiert werden, um Aktionen zu initiieren.

#### 4.4.4. Implementierung

Da zur Erstellung der virtuellen Welt das *InstantReality*-Framework eingesetzt wird und dieses bereits an die *Open Dynamics Physic Engine* (ODE) angebunden ist, wurde diese zur physikalischen Berechnung gewählt und den Anforderungen entsprechend erweitert. Es handelt sich um eine frei verfügbare Engine (für nicht kommerzielle Zwecke), sodass keine weiteren Kosten anfallen. Realistische Reaktionen erfordern aber eine angemessenen Reibungssimulation, welche zusätzlich implementiert wurde [Renner, 2011].

#### 4. TECHNISCHE INTEGRATION MULTISENSORISCHER STIMULI

---

Listing 4.2 zeigt die Einbindung eines dynamischen Objekts in eine physikalische virtuelle Welt. Die physikalische Welt wird mit einem `<DynamicWorld>`-Knoten instanziiert, wobei auch globale Werte für die ganze Welt festgelegt werden können. Dazu gehören die Schwerkraft im Feld `gravity` (Standardwert ist  $9,8m/s$  für erdähnliche Bedingungen) und das Feld `maxFrameTime`, mit dem das **Verhältnis von Genauigkeit und Framerate** angegeben wird. Folgend können dynamische wie auch statische Objekte definiert werden. Per default sind alle Objekte statisch und besitzen die Eigenschaften Reibung (`friction`) und Feedback (`feedback`). Dynamische Objekte hingegen müssen über den Knoten `<DynamicObjekt>` erstellt werden und besitzen zusätzliche Felder für Masse (`mass`), Dichte (`density`) und Luftwiderstand (`drag`).

Die Simulation taktiler Reize erfolgt bei detektierter Benutzer-Objekt-Berührung. Eine Ausgabe ist sowohl mit den Datenhandschuhen (fingerstimulierend) wie auch der WiiRemote (Vibration) möglich. Im Falle der ART Datenhandschuhe wird eine Modulation der Stärke in Abhängigkeit zu den Materialkonstanten sowie die Eintauchtiefe in Abhängigkeit von der Berührungstiefe berechnet. Für die WiiRemote ist eine simple Ein-/Aus-Funktion entwickelt worden.

Listing 4.2: Um ein physikalisches Objekt in die virtuelle Welt einzufügen, müssen die Objekteigenschaften (vgl. Zeile 5) so realistisch wie möglich angegeben werden. Die angeschlossene Physik-Engine nutzt diese Daten zur Berechnung der visuellen Ausgabe.

```
1 <DynamicWorld gravity='0 -9.8 0' erp='0.08' cfm='0.005'  
  stepFast='false' maxFrameTime='0.03' maxIterations='10'  
  collideJointBodies='true' >  
2   <Group DEF='staticGroup'>  
3   </Group>  
4   <Group DEF='dynamicGroup'>  
5     <DynamicObjekt mass='0.5' density='2' friction='0.2'  
      drag='0.4' enable='true'>  
6       [...]  
7     </DynamicObjekt>  
8   </Group>  
9 </DynamicWorld>
```

#### 4.4.5. Zusammenfassung

Eine technische Evaluation zeigte, dass bis zu 40 Objekt-Objekt-Kollisionen zeitgleich berechnet werden können. Steigt diese Zahl an, drohen Abstürze oder eine Echtzeitfähigkeit kann nicht mehr garantiert werden. Abbildung 4.10 zeigt die Entwicklung der Bilder pro Sekunde und der Ladezeit in Verhältnis zur Anzahl der dynamischen Objekte. Ist bekannt, dass es nicht zu dauerhaften Objekt-Objekt-Kollisionen kommt, sondern nur vereinzelt Objekte in der Welt physikalisch simuliert werden müssen, sind bis zu 150 dynamische Objekte ohne Verschlechterung der Framerate möglich (gelb). Die Ladezeit (blau) verlängert sich nur geringfügig.

Zur Überprüfung des Gesamtsystems hat [Renner, 2011] fünf Beispiele getestet. Kegeln, Dosenwerfen, Turmbau, Minigolfen und Darts konnten ansprechend simuliert und ausgeführt werden. In Verbindung mit der Gesteninteraktion und dem taktilen Feedback konnte eine natürliche Interaktion erzielt werden.

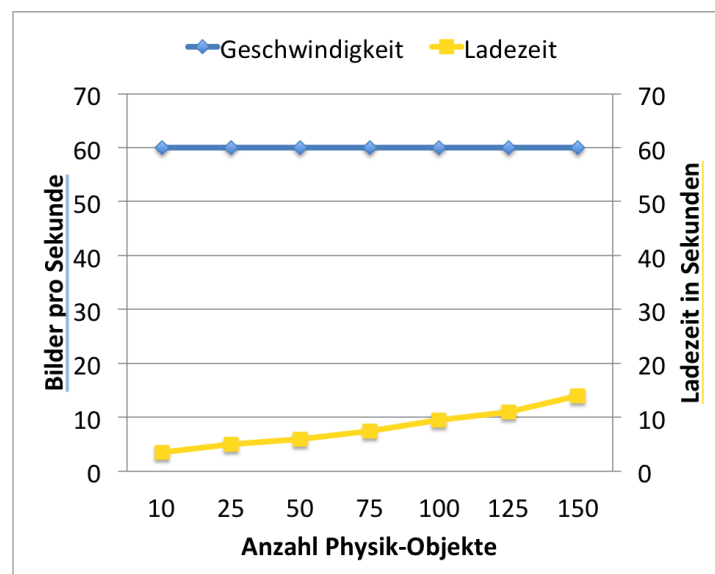


Abbildung 4.10.: Ergebnisse der technischen Evaluation für die Berechnung physikalischer Objekte. Mehr eingefügte physikalische Objekte haben keine Auswirkung auf die Geschwindigkeit der Anwendung (in Blau), solange keine konstanten Objekt-Objekt-Kollisionen berechnet werden müssen. In dem Fall liegt die Obergrenze bei 40 Objekten. Die Ladezeit verringert sich nur geringfügig (in Gelb).

### 4.5. Das Windsystem

Das vorhandene Setup verfügte nicht über die Möglichkeit, Wind auszugeben, sodass in einem ersten Schritt eine Hardwareerweiterung erforderlich war. Im Anschluss wurde ein Windsystem entwickelt, das aus virtuellen Windquellen des Szenenmodells echten Wind in der CAVE erzeugt.

#### 4.5.1. Hardware

Für die Integration in die CAVE sind **Ventilatoren** das Mittel der Wahl (vgl. Abschnitt 3.1.3). Eine tragbare Konstruktion, wie von [Cardin et al., 2007] vorgestellt, würde das Sichtfeld des Besuchers verringern. Da eine Montage unterhalb der Projektionsfläche oder auf Kopfhöhe nur auf zwei Seiten möglich gewesen wäre, wurden die Ventilatoren oberhalb der Projektionswände installiert. Nach [Moon und Kim, 2004] ist es nicht nötig, mehr als acht Ventilatoren in einer Ebene zu installieren, da Menschen nicht dazu in der Lage sind, den von zwei benachbarten Windquellen erzeugten Luftstrom zu unterscheiden, wenn der Winkel zwischen den Quellen weniger als  $45^\circ$  beträgt. Zusätzlich fanden sie heraus, dass eine Anbringung in verschiedenen vertikalen Ebenen nur bedingt nötig ist, da die horizontale Unterscheidungsfähigkeit des Menschen stärker ausgeprägt ist.

Acht Ventilatoren, die möglichst gleichmäßig oberhalb der CAVE installiert werden, können diesen Anforderungen gerecht werden. Eine Windsimulation sollte zudem **richtungsabhängige Ausgaben** erzeugen. Diese sind zum Besucher geneigt ausgerichtet, sodass der Haupteffekt in der Mitte der Installation zu spüren ist. Eine kreisförmige Verteilung würde den Anforderungen optimal entsprechen. In unserer Installation musste sie angenähert werden, da bereits installierte Trackingkameras einen exakten Kreis nicht ermöglicht haben. Abbildung 4.11 skizziert den Aufbau.

Bei der Wahl der Ventilatoren waren vor allem die erzeugte Luftleistung, eine stufenlose Regelung und eine geringe Geräusentwicklung ausschlaggebend. Die übrige Funktionalität (insbesondere das Tracking-System) durfte auf keinen Fall durch eine Verdeckung gestört werden. Die Wahl fiel auf Axiallüfter der Firma ADDA mit einem Durchmesser von 25,4 cm und 2 kg Gewicht (Abbildung 4.12(a)). Mit einem Luftdurchsatz von bis zu 12,735 cmm (Kubikmeter pro Minute) bei einer maximalen Geräusentwicklung von 55,6 dB/A konnten alle Anforderungen bestmöglich erfüllt werden. Die Installation erfolgte mittels speziell erstellter Halterungen oberhalb der Projektionsfläche (Abbildung



4.12(b)). Die Ansteuerung der Ventilatoren ist mit zwei MultiDim MKIII Dimmerpacks der Firma ShowTec realisiert worden (Abbildung 4.12(c)). Üblicherweise werden diese Geräte zur Lichtsteuerung eingesetzt und bieten jeweils vier Ausgänge. Hiermit ist es möglich, jeden Ventilator über ein DMX-Signal einzeln anzusteuern. Die Umsetzung dieser Ansteuerung wurde von [Lüdike, 2012] im Rahmen seiner Bachelorarbeit realisiert.

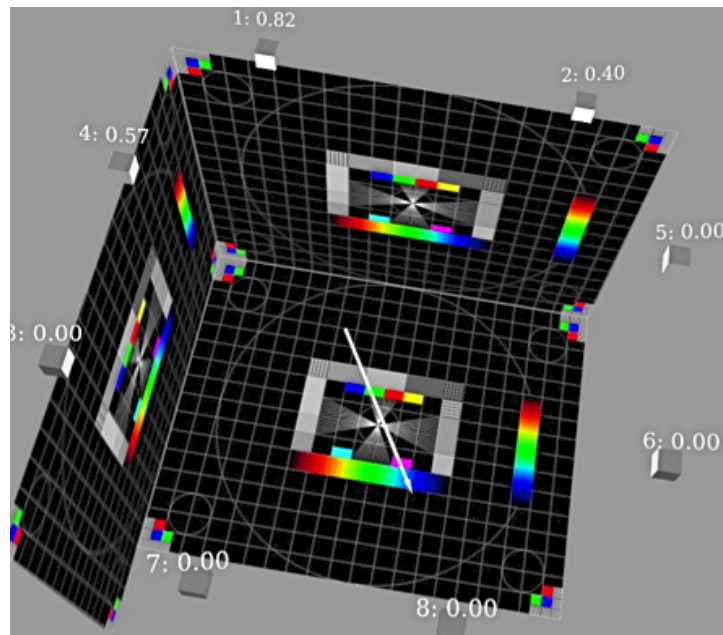


Abbildung 4.11.: Installation der Ventilatoren oberhalb der Projektionswände erfolgt zum Besucher geneigt und in angenäherter Kreisform.



(a) Axiallüfter der Firma ADDA.



(b) Die Installation in einer Ecke der CAVE.



(c) Die zur Ansteuerung verwendeten MultiDim MKIII Dimmerpacks der Firma ShowTec.

Abbildung 4.12.: Verwendete und installierte Hardware zur Generierung von Wind.

### 4.5.2. Konzeption

Nach erfolgreicher Hardwareinstallation mussten zusätzliche Anforderungen für die Softwareintegration aufgestellt werden. Die Windausgabe sollte unter Berücksichtigung der Einflüsse in der virtuellen Welt physikalisch korrekt berechnet werden. Dies würde allerdings einen zu großen Rechenaufwand verursachen. Analog zu der akustischen Ausgabe wurde ein Konzept entwickelt, mit dem Windeinflüsse in drei Kategorien eingeteilt werden, um eine Balance zwischen Realitätstreue und Rechenaufwand zu halten.

Als minimale Anforderung muss ein Windsystem eine richtungsabhängige Windquelle darstellen können. Dieser sogenannte **ambiente Wind** beschreibt den globalen Umgebungswind, der zumeist ein Wetterphänomen ist. Im Gegensatz zu den ambienten Klängen hat er aber eine Richtung, indem er aus einer unendlichen weit entfernten Quelle kommt. Die Richtung ist eindeutig wahrnehmbar, wird aber nur grob repräsentiert, dafür bieten sich wie in der realen Welt die Himmelsrichtungen an. Eine Verdeckungsrechnung muss mit einbezogen werden, sodass zum Beispiel im Inneren eines Gebäudes vor dem Wind Schutz gesucht werden kann, er aber durch die offenen Fenster doch spürbar ist. Es kann immer nur ein ambienter Wind simuliert werden. Soll die Windrichtung an zwei verschiedenen Orten innerhalb der gleichen virtuellen Welt geändert werden, ist eine Überblendung ähnlich der akustischen Ausgabe denkbar.

Als zusätzliche wünschenswerte Ausgabefähigkeit sollte ein Windsystem auch **lokale Windquellen** simulieren können, gleichbedeutend mit richtungsabhängigem Wind, wie zum Beispiel von einem virtuellen Tischventilator. Objekte dieser Art strahlen ihren Wind (im Gegensatz zu den statischen Soundquellen) in eine feste Richtung ab und besitzen nur eine begrenzte Reichweite. Es muss ein Einflussbereich (in Form eines Kegels ausgehend von dem Objekt) definiert werden. Somit kann hinter dem virtuellen Ventilator kein Wind gespürt werden. Zusätzlich zu den Verdeckungen muss eine Abschwächung je nach Entfernung zur Reizquelle berechnet werden, um den Eindruck so realistisch wie möglich zu gestalten. Auch das Anwendungsbeispiel des Fahrtwindes lässt sich so modellieren, indem die umgekehrte Fahrtrichtung als Windrichtung definiert wird und die Stärke der Geschwindigkeit angepasst wird.

**Event-Wind** wird nur bei bestimmten Ereignissen erzeugt. Dahinter steckt die Idee, auch einen kurzen Luftzug, wenn zum Beispiel die Tür schnell geschlossen wird oder ein virtueller Zug vorbei fährt, darzustellen.

### 4.5.3. Realisierung und Implementierung

Für die Umsetzung eines solchen Windsystems bietet sich wiederum eine Client-Server-Struktur an, wobei der Server die Gesamtausgabe berechnet. Zur einfachen Einbindung von ambientem Wind bietet sich eine Repräsentation entsprechend eines realen Wetterphänomens an. Somit kann die Richtung als Himmelsrichtung verstanden werden, wobei acht grobe Richtungen ausreichen (Norden, Nord-Ost, Osten, Süd-Ost, Süden, Süd-West, Westen, Nord-West). Bei entsprechendem Bedarf ist es aber möglich, die Richtung auf  $1^\circ$  genau anzugeben. Die Windstärke wird häufig anhand der **Beaufortskala** angegeben, die 1935 von der ersten internationalen meteorologischen Konferenz in Brüssel als allgemein gültig angenommen wurde. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick der damit darzustellenden Stärken und ihrer Interpretation in dem vorgestellten Windsystem. Diese Einheit soll in das Gesamtsystem übernommen werden, um eine intuitive Festlegung von ambientem Wind zu ermöglichen, dennoch ist eine Definition im Intervall  $[0..1]$  als Alternative umgesetzt. 0 steht dabei für 'Aus' und 1 für maximale Aktivierung. Eine Kombination aus Himmelsrichtung und Beaufortskala bereitet zusätzlich eine Web-Anbindung an einen Wetterdienst vor, da der Wind dort meist genau so angegeben ist. Somit wäre es zum Beispiel möglich, den aktuell herrschenden Wind an einem beliebigen realen Ort in die virtuelle Welt zu übertragen.

Unser Windsystem bietet bei maximaler Aktivierung eine Windleistung von 64,44  $km/h$ , und somit kann maximal ein stürmischer Wind (Beaufortskala 8) erreicht werden. Eine entsprechende Messung ist an jedem System durchzuführen und die Verbindung zur Windausgabe entsprechend umzusetzen. Da die Beaufort-Skala nicht linear ist, musste eine entsprechende Verrechnung mit der **Aktivierungsleistung** erfolgen, um eine realistische Ausgabe zu generieren (angegeben in Spalte 4 der Tabelle 4.2).

Bei der Übertragung von virtuellen Windquellen auf das Winddisplay sind bestimmte Punkte zu beachten. Zum einen fanden [Moon und Kim, 2004] heraus, dass Wind dann am realistischsten empfunden wird, wenn er von mehreren (am besten drei bis fünf) Ventilatoren dargestellt wird, anstatt nur von einem. Somit wird die Windrichtung nicht exakt mit den Ventilatoren verrechnet, sondern eine Streuung eingebaut, die immer drei Ventilatoren aktiviert. Zum Anderen muss bezüglich der Windstärke berücksichtigt werden, dass Ventilatoren eine Mindestaktivierung benötigen. Laufen sie mit einer zu geringen Drehzahl, gibt es eine starke Geräuschkulisse. Dieser minimale Aktivierungswert ist in Abhängigkeit von den gewählten Ventilatoren zu Beginn zu evaluieren.

Windstärke Beaufort	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit in <i>km/h</i>	Windstärke im Intervall [0..1]
0	Windstille	0 - 2	0
1	leiser Zug	2 - 5	0
2	leichte Brise	6 - 11	0,13
3	schwache Brise	12 - 19	0,24
4	mäßige Brise	20 - 28	0,37
5	frische Brise	29 - 38	0,52
6	starker Wind	39 - 49	0,68
7	steifer Wind	50 - 61	0,86
8	stürmischer Wind	62 - 74	1
9	Sturm	75 - 88	1
10	schwerer Sturm	89 - 102	1
11	orkanartiger Sturm	103 - 117	1
12	Orkan	> 117	1

Tabelle 4.2.: Die Stufen der Beaufortskala mit ihrer allgemeinen Windgeschwindigkeit und ihrer Interpretation in dem entwickelten Windsystem.

In [Fröhlich und Wachsmuth, 2013a] wurde die erste Implementierung eines Windsystems vorgestellt. Ausgehend von den integrierten Systemen für Sound, taktile Reize und Wind entwickelte Felix Hülsmann in seiner Masterarbeit ein **Wärmesystem**, das in das Windsystem integriert ist [Hülsmann, 2013]. Im Rahmen der Entwicklung wurde ein **temperaturbezogener Ansatz** gewählt, bei dem z.B. die Auswirkung von Wind auf die wahrgenommene Temperatur berücksichtigt ist (vgl. [Dionisio, 1996]). Das vorhandene Windsystem wurde von der Neuentwicklung subsumiert und eine einheitliche Integration gewählt. Das oben vorgestellte Konzept der Dreiteilung (ambient, statisch, ereignisbasiert) wurde beibehalten und (wie für die Windquellen bereits konzipiert) auch für Wärmequellen umgesetzt. Detaillierte Informationen zur aktuellen Implementierung und ein Realisierungsvorschlag für ein Wärmesystem finden sich in [Hülsmann et al., 2013] und [Hülsmann et al., 2014].

#### 4.5.4. Zusammenfassung und Erweiterungen

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit erfolgte wiederum eine technische Evaluation. In Abbildung 4.13 ist zu erkennen, dass auch mit ansteigender Anzahl an Windquellen weder mit einer Beeinträchtigung der Echtzeitfähigkeit (in Blau) noch mit zu langen Wartezeiten (in Gelb) zu rechnen ist. Die maximale Anzahl von 75 Quellen ist serverseitig

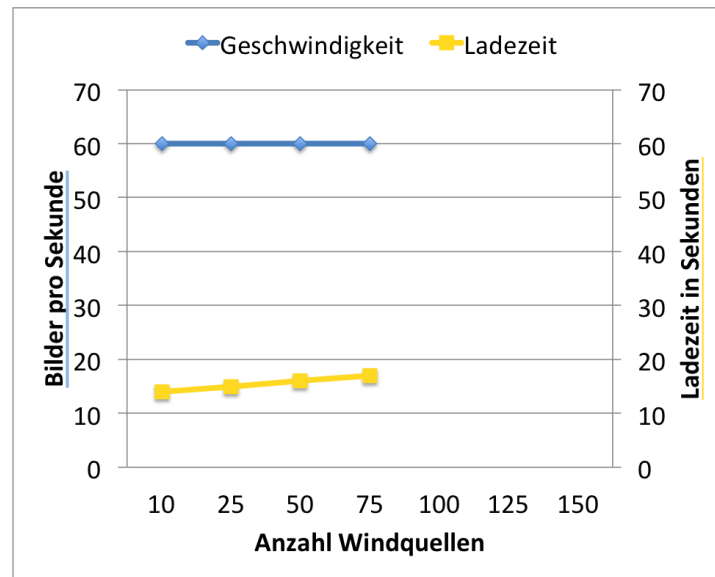


Abbildung 4.13.: Technische Evaluation des Wind- und Wärmesystems. Die maximale Anzahl von 75 Quellen ist serverseitig festgelegt, kann aber bei Bedarf erhöht werden.

festgelegt, um eine Echtzeitfähigkeit zu garantieren. Sie kann aber bei Bedarf weiter erhöht werden, dann wird eine erneute technische Evaluation empfohlen.

Um wichtige Schwellenwerte zur Einbindung der Windquellen festzustellen, wurde eine weitere Studie mit neun Teilnehmern durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass in unserem System die Richtung auf ungefähr  $24^\circ$  genau festgestellt werden kann. Hinzu kam, dass der Aktivierungslevel über 50% betragen sollte, um wirklich von den Besuchern gespürt zu werden. Es gelingt dabei sehr viel schneller wahrzunehmen, wenn bereits vorhandener Wind abgeschaltet wird (Mittelwert = 1,3 Sekunden), wohingegen das Anschalten erst nach im Mittel 3 Sekunden bemerkt wurde. Detaillierte Ergebnisse sind in [Hülsmann et al., 2014] zu finden. Dieses Wissen sollte in den zukünftigen Arbeiten genutzt werden, um beispielsweise die Aktivierungsberechnung aus Tabelle 4.2 neu zu überdenken.

### 4.6. Multisensorische Integration

Für die einzelnen entwickelten Teilsysteme konnte durch technische Evaluationen sowie einfache Anwendungstests bereits eine Leistungsfähigkeit festgestellt werden (vgl. Abschnitte 4.3.4, 4.4.5 und 4.5.4). Eine zufriedenstellende Generierung von multisensorisch angereicherten virtuellen Welten erfordert aber zusätzlich eine Integration in ein Gesamtsystem.

Die **Kopplung des Soundsystems** mit der physikalischen Komponente ermöglicht die zufriedenstellende Realisierung von Event-Sounds. Ausgehend von physikalischen Ereignissen können so passende akustische Ausgaben generiert werden, beispielsweise durch ein Objekt, das auf den Boden fällt. Je nach Objekttyp und der Oberflächenbeschaffenheit des Bodens müssen unterschiedliche akustische Ausgaben gewählt werden. Da es entscheidend ist, dass akustische und visuelle Eindrücke zueinander passen [Bormann, 2008], wurde innerhalb der physikalischen Berechnung eine Funktion integriert, die die wahrscheinliche Flugbahn von Objekten bestimmt. Somit kann eine korrespondierende Audiodatei frühzeitig geladen werden und es entsteht keine Verzögerung.

Um die **Echtzeitfähigkeit** einer multimodalen virtuellen Welt zu gewährleisten, erfolgte eine technische Evaluation des Gesamtsystems, dargestellt in Abbildung 4.14. Auf der x-Achse ist die steigende Anzahl der virtuellen Quellen aufgetragen. Es handelt sich dabei um jeweils  $x$  Soundquellen, physikalische Objekte, Windquellen und Wärmequellen. In Blau dargestellt ist die Framerate der Gesamtanwendung, in Gelb die benötigte Ladezeit zum Starten der Anwendung. Der kritische Punkt wird bei je ca. 75 Quellen erreicht. Danach fällt die Framerate unter 40fps und die Ladezeit steigt exponentiell. Es können also ohne Probleme innerhalb einer Szene 75 Soundquellen, 75 dynamische physikalisch simulierte Objekte, 75 Windquellen sowie 75 Wärmequellen eingebunden werden. Diese Anzahl ist in allen Anwendungen der AG WBS mehr als ausreichend. Sollten für spezielle Szenarien mehr Quellen benötigt werden, sollte die Gesamtstabilität vorher überprüft werden. Problematisch sind häufig die physikalisch simulierten Objekte – ist ihre Gesamtzahl gering, können viele weitere Sound-, Wind oder Wärmequellen generiert werden.

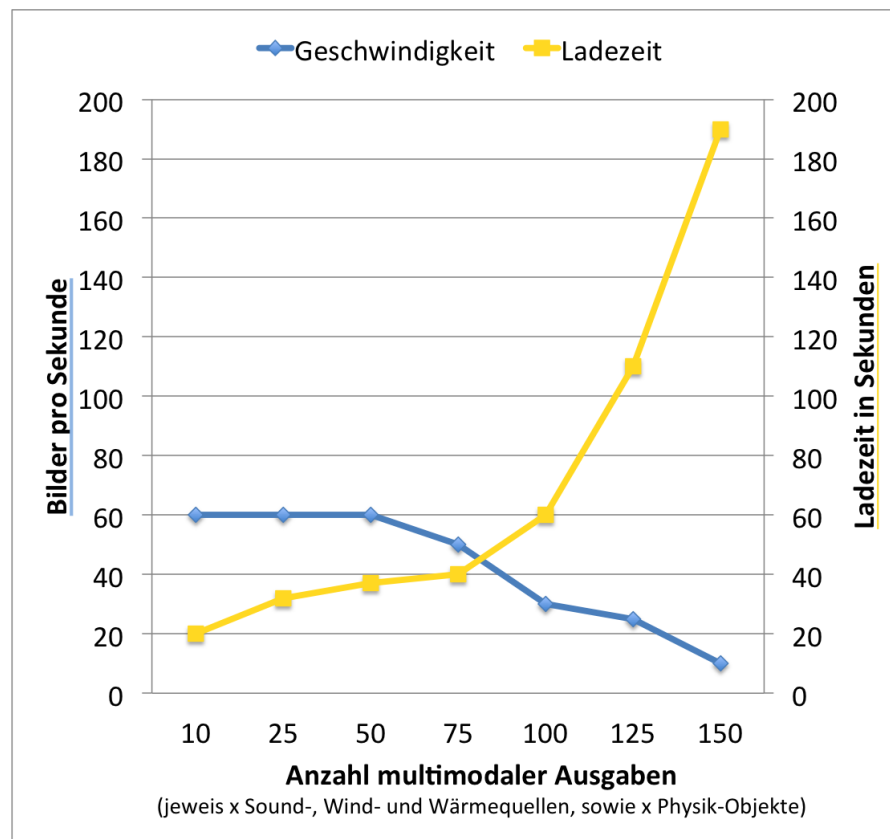


Abbildung 4.14.: Technische Evaluation des entwickelten Gesamtsystems. Auf der x-Achse ist die steigende Anzahl der virtuellen Quellen aufgetragen. Ab jeweils 75 Quellen verringert sich die Framerate (blau) deutlich und die Ladezeit (gelb) steigt exponentiell.

## 4.7. Diskussion

Dieses Kapitel beschrieb, aufbauend auf den Grundlagen und verwandten Arbeiten in Kapitel 2 und 3, die technische Integration eines Soundsystems, eines physikbasierten Systems mit taktiler Ausgabe, eines Windsystems und eines Wärmesystems sowie deren multisensorische Integration. Ziel war die Lösung von Teilproblem 1 unter Berücksichtigung der Anforderungen Effizienz, Natürlichkeit und Vollständigkeit. Zusätzlich wurden die Aspekte der Sicherheit und Kosteneffizienz bei den neuen Installationen berücksichtigt. Ein Ausschnitt des resultierenden Gesamtsystems ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Installation der Wärmelampen, Ventilatoren und Lautsprecher kann exemplarisch erkannt werden, die Verwendung der Datenhandschuhe mit taktilen Feedback ist nicht zu sehen.



#### 4. TECHNISCHE INTEGRATION MULTISENSORISCHER STIMULI

---

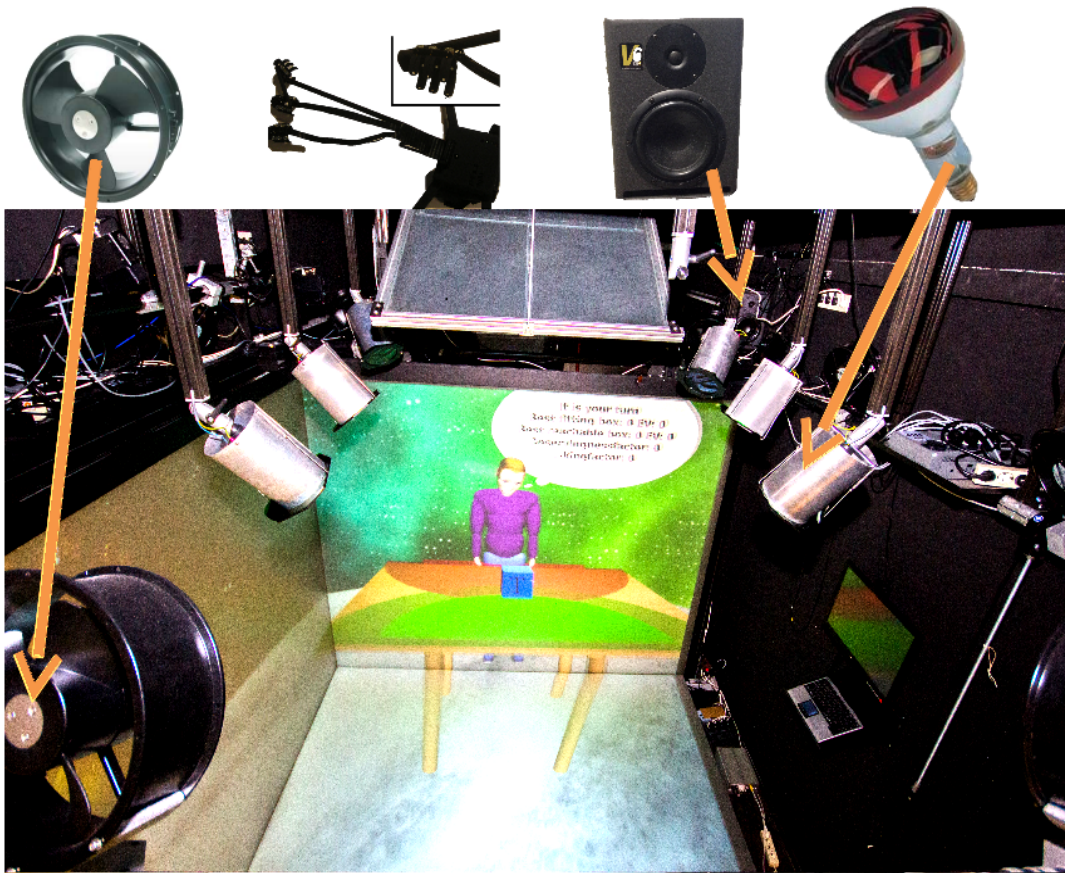


Abbildung 4.15.: Ausschnitt des resultierenden Gesamtsystems. Die Installation der Wärmelampen, Ventilatoren und Lautsprecher kann exemplarisch erkannt werden, die Verwendung der Datenhandschuhe mit taktilem Feedback ist nicht zu sehen.

Die geleisteten Arbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

**Teilziel 1** Um die unterschiedlichen Sinne des Menschen anzusprechen, sollen entsprechende Ausgabemöglichkeiten technisch integriert werden.

- ✓ **Effizienz** Die Berechnung der einzelnen und kombinierten multisensorischen Stimuli erfolgt in Echtzeit und wurde mit den vorhandenen Rechenressourcen realisiert.
- (✓) **Natürlichkeit** Zu Gunsten der Effizienz wurde auf eine physikalisch korrekte Umsetzung verzichtet. Dennoch sind die entwickelten und ausgewählten Berechnungsverfahren nicht als unnatürlich zu bezeichnen. Es wurden Approximationen gewählt, die für einen möglichst realistischen Eindruck sorgen.



(✓) **Vollständigkeit** Die Ausgaben decken ein umfangreiches Spektrum an real auftretenden Phänomenen ab. Um wirklich jedes real auftretende Phänomen darstellen zu können, bedarf es neben einer physikalischen Simulation auch einer exakten Modellierung der Materialeigenschaften. Durch die Dreiteilung in ambiente, statische und ereignisbasierte Quellen ist es aber möglich, eine große Menge an multisensorischen Stimuli zu generieren.

Das folgende Kapitel wird ausgehend von dieser Möglichkeit, multisensorische Stimuli zu generieren, ein wissensbasiertes Konzept vorstellen, mit dem der Arbeitsaufwand bei der Erstellung gering gehalten werden kann.



## WISSENSBASIERTE GENERIERUNG VIRTUELLER WELTEN

Die in Kapitel 4 vorgestellten Erweiterungen ermöglichen es, multisensorische Stimuli für virtuelle Welten zu erstellen. In der Praxis ist dies aber eine schwierige und zeitintensive Aufgabe (Details folgen in Abschnitt 5.1). Demzufolge ist es in vielen Projekten nicht möglich, neben der grafischen Ausgabe noch weitere Ausgaben zu berücksichtigen. Um dieser Beobachtung entgegenzuwirken war das zweite Ziel der vorliegenden Dissertation die Entwicklung eines Softwareframeworks, mit dessen Hilfe die Integration der multisensorischen Ausgaben mit geringem Arbeitsaufwand möglich ist. Einleitend wurden dafür bereits Anforderungen formuliert (vgl. Abschnitt 1.2), die in den theoretischen Grundlagen begründet liegen (siehe Abschnitt 2.1.3).

Das folgende Kapitel stellt einen wissensbasierten Ansatz vor, mit dem der Entwicklungsaufwand minimiert werden kann. Es waren alltägliche Erfahrungen, die zur Ausarbeitung des Konzepts motivierten. Die Anforderungen Modularität, Portabilität und Gebrauchstauglichkeit werden berücksichtigt und diskutiert. Anschließend wird eine prototypische Implementierung vorgestellt, die im VR-Labor der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme verwendet wird. Zum Abschluss wird der Transfer in andere Anwendungsfelder vorgestellt. Nachdem die Ergebnisse kritisch betrachtet wurden, werden mögliche Erweiterungen diskutiert.

Teile der hier vorgestellten Arbeiten sind bereits in [Fröhlich und Wachsmuth, 2011b] und [Fröhlich und Wachsmuth, 2012] veröffentlicht.

### 5.1. Motivation

Wie bereits in Abschnitt 3.2 vorgestellt, wird die semantische Anreicherung virtueller Welten schon seit vielen Jahren genutzt, um weiteres Wissen in die virtuelle Welt einzubringen. Bisher wurde dieser Ansatz hauptsächlich genutzt, um den Objekten Wissen über ihre grafischen Eigenschaften mitzugeben. In dem Projekt Virtuelle Werkstatt wurden Bauteile beispielsweise mit Wissen angereichert, um intelligente Verbindungsstellen oder parametrische Veränderungen zu ermöglichen [Latoschik et al., 2005]. Die Operationen mit diesen Bauteilen wurden zusätzlich mit charakteristischen Geräuschen unterlegt, die aber von Hand in den Quellcode eingepflegt wurden. Dieser Arbeitsschritt wird häufig aus **Zeit- und Kostengründen** ausgelassen. Somit scheint es sinnvoll, die Idee der semantischen Anreicherung auch für weitere Ausgabekanäle zu nutzen.

Um die in Kapitel 4 vorgestellten Erweiterungen einzusetzen, muss ein virtuelles Objekt sehr detailliert für die verschiedenen Modalitäten beschrieben werden. Neben der anfallenden grafischen Modellierung werden viele weitere Informationen benötigt, von denen die meisten nicht universell genutzt werden können. Abbildung 5.1 illustriert die benötigten Informationen für eine entsprechende Anreicherung am Beispiel eines virtuellen Föns. Es kann angenommen werden, dass der Arbeitsaufwand linear mit der Anzahl der eingebauten Modalitäten steigt. Zur Veranschaulichung können die notwendigen Schritte der akustischen Erweiterung, wie im Folgenden beschrieben, betrachtet werden:

- Zunächst ist eine angemessene **Audiodatei** notwendig. Entweder muss selber eine entsprechende Aufnahme angefertigt werden, dafür bedarf es aber eines Tonstudios und der entsprechenden Requisiten und Fachkräfte, oder eine geeignete Datei muss erworben werden. Das Internet bietet viele frei verfügbare Audiodateien (vgl. z.B. [SoundBible, 2014]), allerdings gleicht die Suche danach häufig der nach der Nadel im Heuhaufen. Wurde eine entsprechende Datei gefunden, passt sie häufig nicht zu 100% in den Anwendungskontext und kleinere Bearbeitungen müssen vorgenommen werden, welche wiederum Fachkenntnisse und Zeit benötigen.
- Zur Integration in die virtuelle Welt werden **weitere Informationen** benötigt (Position in der virtuellen Welt, Lautstärke, Wiedergabemodus). Je exakter diese Daten vorliegen, umso realistischer wird die spätere Ausgabe erscheinen. Details wurden in Abschnitt 4.3 dargelegt.

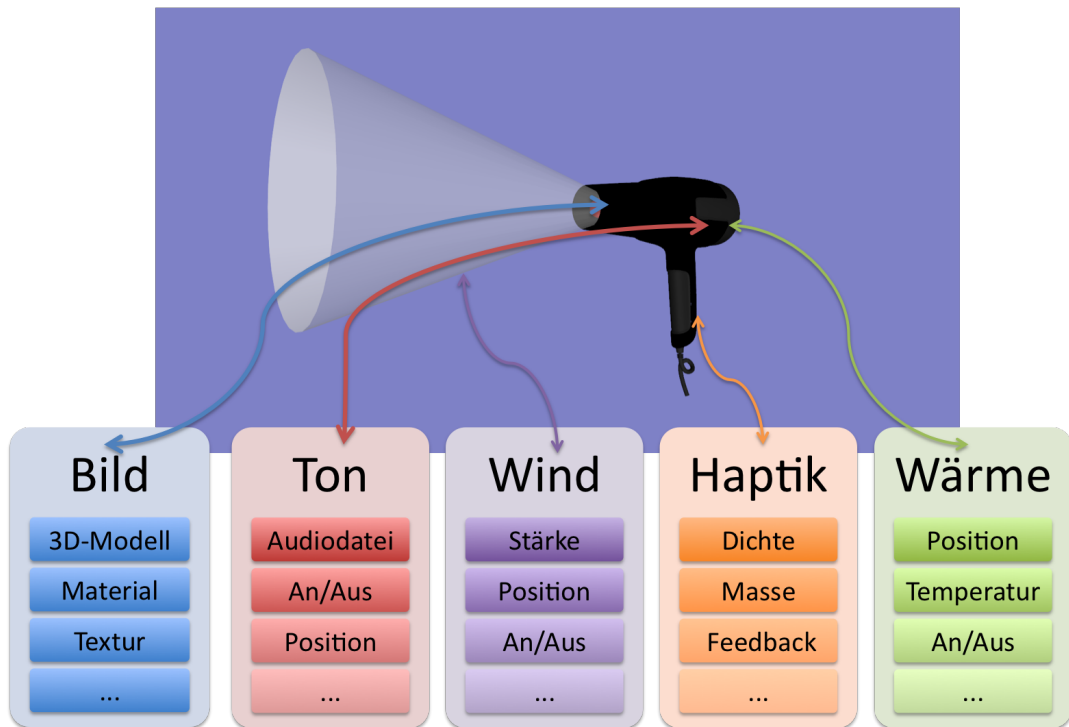


Abbildung 5.1.: Exemplarische Informationen, die zur Entwicklung eines virtuellen Objektes benötigt werden. Am Beispiel eines Föhns und der in Kapitel 4 vorgestellten Stimuli sind das Bild, Ton, Haptik, Wind und Wärme.

- Ein entsprechender **Soundknoten** muss in die Anwendung eingebunden werden, um abschließend eine Ausgabe zu generieren.

Die gesammelten Informationen können anschließend (mit Ausnahme der Position) nicht für die weiteren Ausgabestimuli wiederverwendet werden. So müssen physikalische Eigenschaften wie Masse und Dichte möglichst korrekt festgelegt werden, damit virtuelle Objekte realistisch auf Interaktionen reagieren können. Diese Parameter sind für Objekte, die es auch in der realen Welt gibt, vergleichsweise leicht zu bestimmen, für nicht reale Objekte oder noch zu entwickelnde Bauteile<sup>1</sup> ist die Bestimmung hingegen eine schwierige Aufgabe.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Erstellung eines einfachen virtuellen Föhns mehrere Arbeitsstunden in Anspruch nehmen kann. Soll eine reichhaltige virtuelle Welt mit einer Vielzahl an Objekten erstellt werden, ist dies meist nicht praktikabel, weil der Arbeitsaufwand zu hoch ist. Eine Kosten-Nutzen-Analyse führt zu dem Ergebnis, dass

<sup>1</sup>z.B. beim virtual prototyping

der potentielle Mehrwert (z.B. eine Verbesserung der Präsenz) den Arbeitsaufwand nicht rechtfertigt. Durch diese Feststellung lässt sich auch die Frage beantworten, warum in aktuellen VR-Projekten nur vereinzelt multisensorische Stimuli ausgegeben werden. Dies geschieht nämlich genau dann, wenn sie für die Szene eine wichtige Bedeutung haben und der damit verbundene Aufwand einen entsprechenden Nutzen hat.

Ausgehend von dieser Betrachtung stellt sich die Frage, ob es gelingen könnte, diese aus dem Arbeitsalltag der Programmierer vertrauten Aufgaben durch wissensbasierte Techniken zu unterstützen.

### 5.2. Ein wissensbasierter Ansatz zur Generierung multisensorischer Stimuli

Die Idee einer wissensbasierten Unterstützung kann neben den grafischen Eigenschaften auch zur Generierung multisensorischer Stimuli genutzt werden. Objekte die “wissen, was sie sind”, können so selbstständig ihre Ausgaben in die Welt einbringen. An erster Stelle steht die grafische virtuelle Welt, deren Objekte semantisch annotiert werden. Dieser Vorgang kann während der grafischen Entwicklung stattfinden und benötigt kaum zusätzliche Arbeitszeit. Anhand dieser Informationen muss dann eine Ausgabe generiert werden.

Um eine Verknüpfung von semantischer Annotation und multisensorischen Stimuli herzustellen, wird ein dreischrittiger Prozess vorgeschlagen: (1) Einlesen der Szene und Extraktion der hinterlegten Informationen, (2) Abgleich mit einer Wissensbasis und (3) Generierung der gewünschten multisensorischen Ausgaben innerhalb der virtuellen Welt. Abbildung 5.2 skizziert den Ablauf, der im Folgenden näher erläutert wird.

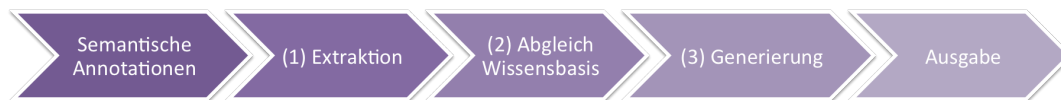


Abbildung 5.2.: Konzept einer wissensbasierten Generierung multisensorischer Stimuli. Ausgehend von semantischen Annotationen erfolgt mittels der drei Arbeitsschritte (1) Extraktion der Informationen, (2) Abgleich mit einer Wissensbasis und (3) Generierung der gewünschten multisensorischen Stimuli eine Ausgabe auf den entsprechenden Ausgabemedien.

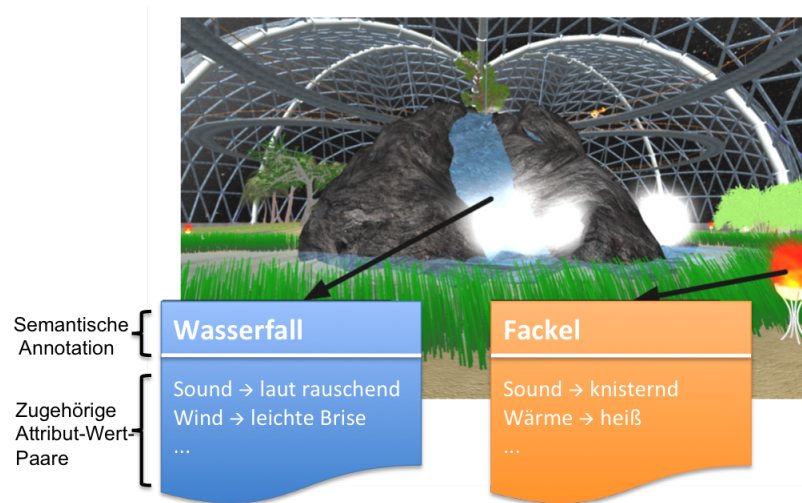


Abbildung 5.3.: Am Beispiel eines Wasserfalls und einer Fackel ist zunächst die semantische Annotation zu erkennen. Diese wird vom Parser abgespeichert und in einem zweiten Schritt mit einer Wissensbasis abgeglichen, um die entsprechenden Objekteigenschaften anhand des Typs festzulegen.

### 5.2.1. Extraktion semantischer Annotationen

Die Annotation der Objekte in der virtuellen Welt wird durch den Programmierer bzw. Designer vorgenommen. Sie bildet die Grundlage für die weiteren Schritte, in denen aus diesen Informationen konkretes Wissen über die virtuellen Objekte gewonnen und der Welt hinzugefügt wird. Um Wissen über Objekte maschinenverarbeitbar zu machen, eignen sich symbolische Repräsentationen.

Abbildung 5.3 illustriert die exemplarische Unterlegung von zwei virtuellen Objekten als **Typ-Zuweisung**, wodurch das Wissen an den Objekten verankert wird. Die “Überschrift” (im Bild Wasserfall und Fackel) stellt die Annotation dar, aus der im weiteren Verlauf das Wissen gewonnen wird. Dafür muss in einem ersten Schritt die Annotation eingelesen und zur Weiterverarbeitung vorbereitet werden. Sogenannte **Parser**<sup>2</sup> haben sich etabliert, um Dateien einzulesen und die enthaltenen Informationen nach bestimmten Kriterien abzuspeichern. Der Parser bildet die Schnittstelle zur Verarbeitungskomponente und muss dementsprechend in Abstimmung mit dem Gesamtsystem entwickelt werden. Der Parser extrahiert die Annotation und gibt sie zur zweiten Komponente weiter, in der ein Abgleich mit der Wissensbasis passiert. Dieser Schritt wird im folgenden

<sup>2</sup>zu Deutsch meist Zerteiler

Abschnitt 5.2.2 erläutert. Algorithmus 1 illustriert die genannten Schritte anhand von Pseudocode. Um die Informationen intern zwischenspeichern, bieten sich beispielsweise, wie schon in Abschnitt 3.2 erwähnt, semantische Netze an, die einmal aufgebaut eine inhaltliche Repräsentation der Szene liefern, welche jederzeit erneuert werden kann und hierarchische Beziehungen festhält.

```
Data : Lese die (durch den Entwickler vorgenommenen) semantischen
        Annotationen ein und speichere sie in einer internen Repräsentation
Result : Eine Repräsentation, die die zwischengespeicherten Objekte mit der
        zugehörigen Annotation enthält
Scenegrph scene = LoadVirtualWorld ( file );
List iObjects;
List Objects = FindObjectsInVirtualWorld( scene );
foreach o in Objects do
    if o.hasAnnotations then
        InternalObject iObject;
        Annotation a = o.Annotation;
        iObject.AddAnnotation( a );
        iObjects.Insert( iObject );
    else
        | continue;
end
return InternalObjects;
```

**Algorithmus 1** : Extrahieren der semantischen Annotationen

### 5.2.2. Abgleich mit einer Wissensbasis

Ausgehend von der semantischen Annotation wird eine Wissensbasis benötigt, mit der die vom Parser extrahierten Informationen abgeglichen werden. Dieser Schritt stellt die eigentliche Gewinnung von Wissen dar. In Abbildung 5.3 sind diese Informationen im unteren Teil der Kästen zu sehen, dazu gehören in beiden Fällen eine akustische Ausgabe, für die Fackel aber auch eine Wärmequelle und für den Wasserfall eine leichte Brise.

Als Wissensbasis wird eine Liste von Attribut-Wert-Paaren bereitgestellt. Für jedes Objekt sind dabei die zugehörigen Eigenschaften hinterlegt. Eine Eigenschaft kann durch ein Paar  $[a, w]$  beschrieben werden. Dabei bezeichnet  $a$  das Attribut und  $w$  den zugehö-



rigen Wert aus dem Wertebereich  $Wa$ . Im Beispiel der Fackel aus Abbildung 5.3 wird also dem Attribut Wärme der Wert heiß, also [Wärme, heiß] zugeordnet.

Bei der Entwicklung eines Systems, das eine Wissensbasis als Grundlage nutzt, sollte die Schnittstelle zur Wissensbasis möglichst offen gehalten werden, sodass sie später wieder ausgetauscht werden kann. Für den Abgleich mit der Wissensbasis müssen die Beziehungen zwischen dieser und der internen Wissensrepräsentation auf zwei verschiedenen Ebenen das Kriterium der Eindeutigkeit erfüllen:

1. **Referentielle Eindeutigkeit:** Es kommen keine Mehrdeutigkeiten in Bezug auf die Referenten vor. Zu diesem Zweck bekommt:

- a) jedes Individuum einen eindeutigen Namen
- b) jeder Name genau ein zugeordnetes Individuum

Statt der Bezeichnung Fackel wird also Fackel-1, Fackel-2 usw. genutzt. Diese eindeutigen Objekte werden auch als Instanzen bezeichnet.

2. **Semantische Eindeutigkeit:** Es dürfen keine Mehrdeutigkeiten in der sprachlichen Bezeichnung der Instanzen auftreten. Ein Beispiel hierfür ist das deutsche Wort "Bank". Dieses sogenannte Homonym kann sowohl die "Geldbank" als auch die "Sitzbank" bezeichnen.

Um große Datenmengen zu speichern, haben sich **Datenbanken** etabliert. Durch erprobte Organisations- und Zugriffsmechanismen können (auch große Datenmengen) effizient verwaltet werden (weitere Informationen z.B. in [Piatieski und Frawley, 1991]). Datenbanken enthalten sogenannte Entitäten, die Objekte in der Welt darstellen und eindeutig von anderen Objekten unterschieden werden können. Eine Menge von Entitäten mit gleichen Eigenschaften wird auch als Entitätsmenge bezeichnet. So emittieren alle Fackeln Wärme, während alle Wasserfälle Geräusche abgeben. Die Gesamtheit aller Entitäten einer Entitätsmenge wird dabei auch als ihre Extension bezeichnet. Eine Entität wird beschrieben durch eine Menge von Attributen, die auf alle Entitäten einer Entitätsmenge zutrifft. Einige dieser Attribute sind eindeutig und können verwendet werden, um die zugehörige Entität von anderen zu unterscheiden. Diese bezeichnet man auch als **Schlüssel** oder im Englischen Key. Die eindeutige Beziehung zwischen den Instanzen der oben beschriebenen internen Wissensrepräsentation mit den Entitäten der Datenbasis kann hergestellt werden, indem die Annotation des Objekts als Schlüssel verwendet wird. Jede Entität beinhaltet dabei konkrete Werte für ihre diversen Attribute,

die verwendet werden, um die Eigenschaften der virtuellen Objekte mit Wissen zu füllen. Algorithmus 2 illustriert die durchzuführenden Schritte in Pseudocode.

**Data** : Durchsuche die Wissensbasis der Objekte in der internen Repräsentation und fülle diese mit konkreten Werten

**Result** : Eine Liste interner Objekte, gefüllt mit Attribut-Wert-Paaren

```
List iObjects = getInternalObjects();
```

```
foreach iObject in iObjects do
```

```
    Key k = iObject.Annotation;
```

```
    Entry kbEntry = findKnowledgeBaseEntry( k );
```

```
    if kbEntry != null then
```

```
        List Attributes = kbEntry.Attributes;
```

```
        foreach att in Attributes do
```

```
            storeAtInternalObject( iObject, Pair( att.Name, att.Value ) );
```

```
        end
```

```
    continue;
```

```
end
```

```
return iObjects;
```

**Algorithmus 2** : Abgleich der semantischen Annotationen mit der Wissensbasis

In einer Datenbank für multisensorische Stimuli sind alle Informationen zur Ausgabe gespeichert. Diese müssen in einem letzten Schritt verarbeitet werden, um die gewünschte Ausgabe zu erzeugen. Eine groß angelegte Datenbank mit multisensorischem Wissen ist ein wünschenswertes Produkt, das in so einer Form aber nicht erhältlich ist. Es gibt Bestrebungen, Informationen so zu sammeln, dass sie universell wieder eingesetzt werden können (vgl. beispielsweise [Latoschik und Tramberend, 2011]). Dafür bieten sich, wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, unter anderem sogenannte Ontologien an, die in vielen Kontexten eingesetzt werden können und leicht erweiterbar sind [Wiebusch und Latoschik, 2012].

### 5.2.3. Wissensbasierte Generierung multisensorischer Stimuli

In einem letzten Schritt müssen konkrete Ausgaben erzeugt werden. Hierzu muss ein Mechanismus benutzt werden, der an dedizierten Stellen im eingelesenen Dokument neue Knoten einfügt und somit den Szenengraph erweitert. Für diese Aufgabe haben sich sog-

nannte **Writer**<sup>3</sup> etabliert. Diese müssen wie auch die Parser für das spezifische Format beziehungsweise die jeweilige Programmiersprache angepasst werden. Der Writer fügt ausgehend von den Objekten der internen Repräsentation, die mit konkreten Attribut-Wert-Paaren gefüllt wurden, dem Szenengraph neue Knoten hinzu. Diese werden den von dem Entwickler annotierten Objekten als Kindknoten hinzugefügt, um eine Zuordnung zu ermöglichen. Die so entstandene virtuelle Welt ist dann um multisensorische Stimuli angereichert, während der Arbeitsaufwand gering gehalten werden konnte. Der beschriebene Vorgang wird in Pseudocode in Algorithmus 3 dargestellt.

```

Data : Füge dem Szenengraphen neue Knoten hinzu, die die konkreten
          Attribut-Wert-Paare der zugehörigen Objekte enthalten
Result : Eine um multisensorische Stimuli angereicherte virtuelle Welt
Scenegrph scene LoadVirtualWorld ( file );
List iObjects getInternalObjects();
List Objects = FindObjectsInVirtualWorld( scene );
foreach iObject in iObjects do
    | Object o = Objects.Find( iObject.Annotation );
    | List Attributes = iObject.Attributes;
    | foreach att in Attributes do
    | | o.AddChildNode(att);
    | end
end
return scene;

```

**Algorithmus 3** : Hinzufügen der konkreten Informationen zur virtuellen Welt

#### 5.2.4. Resultierendes Konzept

In Abschnitt 5.2 wurde ein dreistufiger Prozess vorgeschlagen, um eine Verknüpfung von semantischen Annotationen und multisensorischen Stimuli herzustellen. Es wurde ein Konzept entwickelt, welches die vorgeschlagenen drei Schritte (1) Einlesen der Szene und Extraktion der hinterlegten Informationen, (2) Abgleich mit einer Wissensbasis und (3) Generierung der gewünschten multisensorischen Ausgaben innerhalb der virtuellen Welt umsetzt. Algorithmus 4 vereint das resultierende Konzept.

---

<sup>3</sup>Deutsch: Schreiber

```

Data : Lese semantischen Annotationen ein, gleiche sie mit der Datenbasis ab und
         generiere daraus multisensorische Stimuli in der virtuellen Welt
Result : Die virtuelle Welt angereichert mit multisensorischen Stimuli
Scenegrph scene = LoadVirtualWorld ( file );
List iObjects;
List Objects = FindObjectsInVirtualWorld( scene );
forall the o in Objects do
    | if o.hasAnnotations then
    | | InternalObject iObject;
    | | Annotation a = o.Annotation;
    | | iObject.AddAnnotation( a );
    | | iObjects.Insert( iObject );
    | | continue;
end
forall the iObject in iObjects do
    | Key k = iObject.Annotation;
    | Entry kbEntry = findKnowledgeBaseEntry( k );
    | if kbEntry != null then
    | | List Attributes = kbEntry.Attributes;
    | | forall the att in Attributes do
    | | | storeAtInternalObject( iObject, Pair( att.Name, att.Value ) );
    | | end
    | | continue;
end
forall the iObject in iObjects do
    | Object o = Objects.Find( iObject.Annotation );
    | List Attributes = iObject.Attributes;
    | forall the att in Attributes do
    | | o.AddChildNode(att);
    | end
end
return scene;

```

**Algorithmus 4** : Resultierender Algorithmus bestehend aus drei Teilen: Extraktion semantischer Annotationen, Abgleich mit einer Datenbasis und Hinzufügen eines Knotens.

## 5.3. Implementierung

Die Umsetzung erfolgte basierend auf dem von der AG WBS genutzten InstantReality-Framework, während zur Ausgabe der multisensorischen Stimuli die in Kapitel 4 vorgestellten Erweiterungen genutzt werden. Aufbauend auf dem X3D-Standard können die Knoten des **Szenengraphen** mit so genannten **Metadaten** versehen werden. Diese werden während der Interpretation des eigentlichen Quelltextes nicht verarbeitet und eignen sich damit, um semantische Informationen zu hinterlegen.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5.4 die Entwicklung einer VR-Soundkomponente, die akustische Ausgaben mit Hilfe eines 3D-Soundservers wiedergeben kann. Die linke Hälfte (in Blau) stellt das InstantReality Framework dar, und auf der rechten Seite (in Lila) ist die neu hinzugekommene Komponente zu sehen. Die Datenbank fungiert dabei als Wissensbasis, während der Service die Informationen aus den **Metadaten** (semantische Anreicherung) mit den Inhalten der Datenbank verknüpft, um somit eine akustische Ausgabe zu generieren. Für andere Modalitäten ist der Prozess ähnlich aufgebaut, anstelle des Soundservers müssen dann die jeweiligen (in Kapitel 4 vorgestellten) Komponenten angesteuert und eingesetzt werden.

Der gesamte Prozess basiert auf dem in Abschnitt 5.2 vorgestellten Konzept und wird in Abbildung 5.5 dargestellt. Ausgehend von der semantischen Anreicherung der X3D-Szene (über die Metadaten) wird die virtuelle Welt mittels eines XML-Parsers (vom Typ

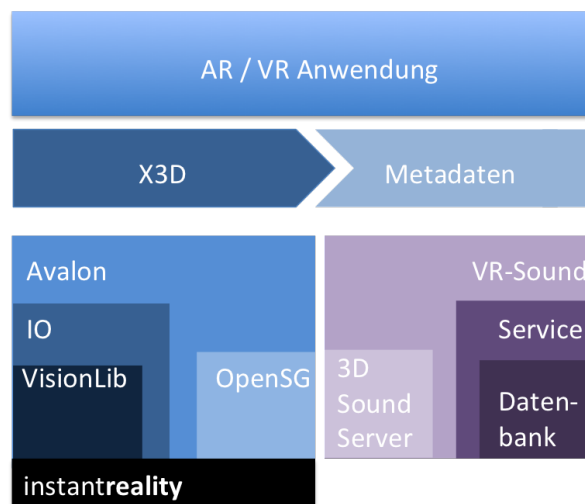


Abbildung 5.4.: Schematischer Aufbau des *InstantReality*-Frameworks, mit neu entwickelter Soundkomponente in der rechten unteren Ecke.

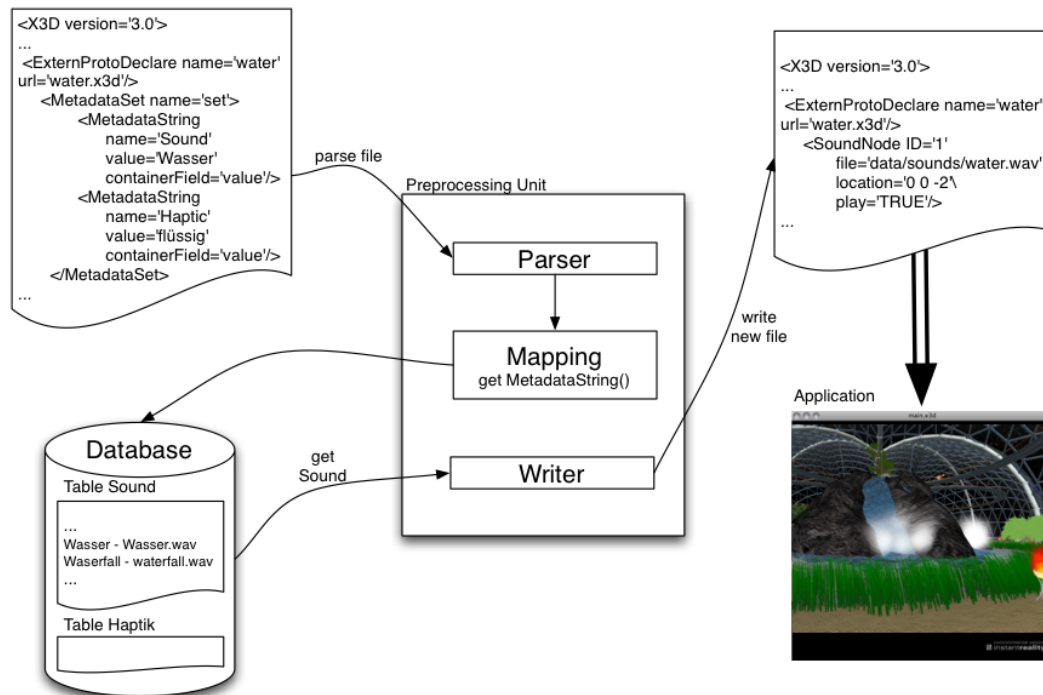


Abbildung 5.5.: Durch Implementierung des wissensbasierten Konzepts können, ausgehend von der X3D-Repräsentierung der virtuellen Welt (oben links), mittels eines Parsers die `<Metadata/>`-Knoten extrahiert werden. Ein anschließender Abgleich mit der Wissensbasis (unten links), die in Form einer Datenbank vorgehalten wird, resultiert in einer Liste von Attribut-Wert-Paaren. Im letzten Schritt fügt der Writer diese Attribut-Wert-Paare als maschinenlesbare Informationen ein und die Anwendung wird mit multisensorischen Stimuli wiedergegeben.

JDOM) eingelesen und mit Hilfe der Abfragesprache XPath nach bestimmten Strukturen durchsucht. Die Metadaten können herausgefiltert und für eine weitere Verarbeitung gespeichert werden.

Metadaten haben zwei wichtige Felder: `name` und `value`. Um der Anforderung der Modularität gerecht zu werden und auch den Einsatz in anderen Anwendungsdomänen offen zu halten, wird das Feld `name` als Zugang zu den multisensorischen Stimuli genutzt. Es kann dabei entweder eine komplette Ausgabe generiert werden (`name='multi'`) oder auch nur eine bestimmte Ausgabe angesprochen werden (z.B.: `name='sound'`). Der Name `Sound` drückt dabei aus, dass es sich um eine Klangeigenschaft handeln muss. Diese ist in einer entsprechenden Tabelle in der Datenbank (unten links) wiederzufinden. Wenn

`name='multi'` angegeben wird, werden alle entsprechenden Tabellen durchsucht. Das Feld `value` beinhaltet den konkreten Wert (zum Beispiel Wasserfall), also den Schlüssel, nach dem innerhalb der **Wissensbasis** gesucht werden kann. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, zu einem Objekt mehrere verschiedene Metadaten anzugeben, welche dann zu einem `<MetadataSet/>` zusammengefasst werden. So kann neben einer einzelnen oder allen Ausgaben (z.B.: `name='sound'` oder `name='multi'`) auch eine beliebige Teilmenge an gewünschten Ausgaben erzeugt werden (beispielsweise nur Wind und Wärme).

Wird in der Datenbank ein passender Eintrag gefunden, kann die korrespondierende Ausgabeinformation an die nächste Verarbeitungskomponente (JDOM-Writer) weitergegeben werden. Sollte kein passender Eintrag existieren, wird dem Objekt kein Kindknoten zugewiesen und auf der Konsole ist eine entsprechende Fehlermeldung zu lesen. In einem letzten Schritt werden konkrete multisensorische Knoten in der X3D-Datei angelegt. Hierzu wird der korrespondierende JDOM-Writer benutzt, welcher an bestimmten Stellen in dem eingelesenen Dokument neue Knoten einfügt. Anschließend kann mit einem Startskriptes automatisch die neu generierte Datei gestartet werden.

## 5.4. Beispielszenario

Am Beispiel des bereits vorgestellten Föns (siehe Abschnitt 5.1) kann demonstriert werden, wie durch diesen Ansatz der Arbeitsaufwand stark verringert werden kann. Listing 5.1 zeigt die Implementierung dieser Szene. Nicht enthalten sind verschiedene Deklarationen, die zu Beginn vorgenommen werden müssen (Zeile 2), sowie die Funktionalitäten innerhalb eines Skriptes, die bei Knopfdruck die einzelnen Ausgaben aktivieren und somit den Fön anschalten (Zeile 17). In den Zeilen 5-12 werden die multisensorischen Informationen von Hand angegeben.

Listing 5.1: Implementierung eines virtuellen Föns ohne den Einsatz der wissensbasierten Generierung.

```
1 <Scene DEF='scene'>
2   [...]
3   <DynamicWorld DEF='dynamicWorld' gravity='0 -9.8 0'
4     erp='0.08' cfm='0.005' stepFast='false'
5     maxFrameTime='0.03' maxIterations='10'
6     collideJointBodies='true' >
7     <Group DEF='dynamicGroup'>
8       <Transform DEF="hairdryer_maintransform">
9         <Inline url="hairdryer_model.x3d"/>
10        <SoundNode DEF="hairdryer_soundnode"
11          file="/vol/kilabor/data/sounds/hairdryer.mp3"
12          ambient="false" loop="true" directStart="false"
13          volume="1.0" start="false"/>
14        <Transform DEF="hairdryer_warmthtransform"
15          translation="0 -3 0">
16          <PointWarmth DEF="hairdryer_warmthnode"
17            intensity="0.7" visualize="true"
18            isActive="false"/>
19        </Transform>
20        <Transform DEF="hairdryer_windtransform"
21          translation="0 -4 0">
22          <SpotWind DEF="hairdryer_windnode"
23            direction="0 -1 0" visualize="true"
24            angle="30" isActive="false"/>
25        </Transform>
26      </Transform>
27    </Group>
28  </DynamicWorld>
29  [...]
30 </Scene>
```



Durch das neu entwickelte Framework ist es nun möglich, diesen Prozess stark zu verkürzen. Listing 5.2 zeigt die Entwicklung der gleichen virtuellen Szene wie in Listing 5.1. Es lässt sich gut erkennen, dass der arbeitsreiche Teil (Zeile 7 bis 12 von Listing 5.1) ausgelassen werden kann, indem dem Fön nur eine semantische Annotation zu der graphischen Darstellung (Listing 5.2, Zeile 7) hinzugefügt wird. Die weitere Verarbeitung erfolgt dann wie in Abschnitt 5.3 beschrieben – die resultierende Ausgabe ist identisch.

Listing 5.2: Implementierung eines virtuellen Föns mit semantischer Annotation in Zeile 7, ermöglicht die Generierung von multisensorischen Stimuli mit geringem Arbeitsaufwand.

```

1 <Scene DEF='scene' >
2   [...]
3   <DynamicWorld DEF='dynamicWorld' gravity='0 -9.8 0'
4     erp='0.08' cfm='0.005' stepFast='false'
5     maxFrameTime='0.03' maxIterations='10'
6     collideJointBodies='true' >
7     <Group DEF='dynamicGroup' >
8       <Transform DEF="hairdryer_maintransform">
9         <Inline url="hairdryer_model.x3d"/>
10        <MetadataString name='multi' value='hairdryer' />
11      </Transform>
12    </Group>
  </DynamicWorld>
  [...]
</Scene>

```

## 5.5. Transfer

Das vorgestellte wissensbasierte Konzept zur Generierung multisensorischer virtueller Welten mit minimalem Aufwand hat in der AG WBS weitere Einsatzgebiete gefunden. Im Folgenden sollen zwei Projekte vorgestellt werden, die sich der vorgestellten Mechanismen bedienen und somit die **Einsatzfähigkeit** und **Portabilität** des Systems belegen.

Bei einem dieser Anwendungsszenarien handelt es sich um virtuelle Agenten. Damit ein Agent glaubhaft in einer virtuellen Welt situiert werden kann, sollte er die virtuellen Objekte wahrnehmen können. Außerdem muss er wissen, wie man mit diesen Objekten interagiert. Auf diese Weise kann die Perzeption des Agenten in Bezug auf virtuelle Objekte in der Welt stark verbessert werden. Eine solche Verbesserung trägt auch zu einem glaubhafteren Verhalten des Agenten bei, da seine kognitiven Fähigkeiten, wie beispielsweise das Planen bestimmter Aktionen, von solchen virtuellen Objekten beeinflusst werden können. [Fischer, 2011] entwickelte im Rahmen seiner Bachelorarbeit ein Versteckspiel mit einem virtuellen Agenten, bei dem mehrere dieser Aspekte berücksichtigt werden mussten. Eine erste prototypische Anbindung des Konzepts wurde umgesetzt. Nähere Information hierzu finden sich in Abschnitt 7.3.2.

In einem weiteren Anwendungsbeispiel werden sogenannte Eyetracker<sup>4</sup> eingesetzt. [Pfeiffer, 2013] hat ein System entwickelt, in welchem blickbasierte Daten erfasst und im Szenengraph gespeichert werden. Hierbei werden aufmerksamkeitsbasierte Annotationen der Szene als Metadaten hinzugefügt, sodass ein “aufmerksamkeitssensitiver Szenengraph” entsteht. Basierend auf diesem lässt sich eine Vielzahl von Interaktionen realisieren, welche zu einer verbesserten Performanz oder einer besseren Bedienbarkeit des Systems beitragen. In Bezug auf die Bedienbarkeit können Blicke auch der direkten Interaktion mit der Szene, z.B. für Selektion und Manipulation, dienen. Die Annotation in Metadaten, wie in Abschnitt 5.3 vorgestellt, bietet verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, die zu einer Verbesserung des Systems und damit der Erfahrung für den Besucher beitragen können.

### 5.6. Diskussion

In diesem Kapitel wurde das Konzept und die daraus resultierende Implementierung eines wissensbasierten Softwareframeworks vorgestellt, mit dessen Hilfe multisensorische Stimuli mit wenig Arbeitsaufwand generiert werden können. Eine Kosten-Nutzen-Analyse sollte kritisch betrachtet werden, denn die Erstellung einer Wissensbasis ist zeitaufwendig. Die Anwendung des vorgestellten Konzepts, bietet also nur dann einen minimalen Arbeitsaufwand, wenn die Wissensbasis bereits vorliegt. Aus diesem Grund ist es umso erstrebenswerter, eine größer angelegte Wissensbasis, beispielsweise im Kontext

---

<sup>4</sup>Geräte, die Daten über die erfolgten Augenbewegungen und die damit zusammenhängenden Fokussierungen erfassen

der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Arbeiten, vorzuhalten. Das in Abschnitt 1.2 formulierte Teilziel 2 und die entsprechenden Anforderungen sollen nun abschließend mit den geleisteten Arbeiten abgeglichen werden.

**Teilziel 2** Es soll ein Softwareframework entwickelt werden, das die Generierung multisensorischer Stimuli mit möglichst wenig Arbeitsaufwand ermöglicht.

- ✓ **Modularität** Die Funktionalitäten des Frameworks wurden in Module gekapselt, so lässt sich beispielsweise die zugrunde liegende Wissensbasis leicht austauschen. Die in Abschnitt 5.5 vorgestellten Transferleistungen zeigen, dass leicht neue Module mit anderen Funktionalitäten angebunden werden können.
- ✓ **Portabilität** Die entwickelten Komponenten wurden hardwareunabhängig entwickelt. Jedoch müssen der Parser sowie der Writer (vgl. Abschnitt 5.2) auf die jeweilige Umgebung angepasst werden, da mit ihrer Hilfe Programmcode eingelesen und generiert wird. Die entsprechenden Funktionen müssen bei einer Portierung überprüft und angepasst werden. Es ist somit zu erwarten, dass die Übertragung in eine andere Umgebung unkompliziert ist, entsprechende Versuche stehen allerdings noch aus.
- (✓) **Gebrauchstauglichkeit** Im angemessenen Rahmen wurden die drei Kriterien der Gebrauchstauglichkeit (Effektivität, Effizienz, Zufriedenheit) nach ISO 9241 berücksichtigt. Es war nicht möglich, im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine entsprechende Usability-Studie durchzuführen. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt die Integration mit ähnlichen Arbeiten zu einem großen Gesamtsystem (wie in Kapitel 2.1.3 vorgestellt) erfolgen, sollte dies nachgeholt werden.

Im nächsten Kapitel folgt die Beschreibung der empirischen Studie zur **Evaluation** der Auswirkung multisensorischer Stimuli auf die Präsenz des Besuchers. Die zu evaluierenden Ausgaben werden dabei von den in Kapitel 4 und 5 vorgestellten Systemen generiert.



## EVALUATION DER AUSWIRKUNG MULTISENSORISCHER STIMULI

In Kapitel 2 wurde erörtert, dass ein Ziel jeder VR-Installation die Einbettung des Besuchers ist. Um die **Präsenz** zu erhöhen, wurde zum Beispiel von [Zeltzer, 1992] eine Erhöhung der Anzahl und eine gleichzeitige Verbesserung der Ausgabemedien vorgeschlagen. [Dinh et al., 1999] fanden in einer Studie heraus, dass multisensorische Stimuli einen Einfluss auf die Präsenz haben. Sie konnten nicht zeigen, dass sich die unterschiedlichen Stimuli gegenseitig beeinflussen und schlossen daraus, dass sich die Integration multisensorischer Stimuli in einer rein additiven Art auf die Präsenz auswirkt. Diese Feststellung kann hinterfragt werden und ist vielleicht in aktuellen Installationen nicht mehr gültig. Durch die höhere mediale Verfügbarkeit, zum Beispiel durch Computerspiele, herrscht eine andere Erwartungshaltung. 1999 gehörten realistische akustische Ausgaben noch zu den selten anzutreffenden Phänomenen und stachen aus der Masse heraus. Knapp 15 Jahre später besitzen schon einfache Computerspiele eine so gute akustische Ausgabe, dass es den VR-Entwicklern schwer fällt, Schritt zu halten.

In den Kapiteln 4 und 5 wurde ein System vorgestellt, das es ermöglicht, eine multisensorische Ausgabe mit geringem Arbeitsaufwand zu erzeugen. Zur Beantwortung von Teilfrage 3 (“Wie kann **evaluiert** werden, wie sich multisensorische Stimuli auf die Präsenz auswirken?”) wurde eine Studie durchgeführt, die im Folgenden beschrieben wird. Als Anforderungen wurden dabei die Erfüllung der **Gütekriterien**, die **Vergleichbarkeit** der Studie sowie die **Nützlichkeit** der Ergebnisse festgehalten. Zunächst erfolgt eine Erörterung von Versuchsaufbau und verwendeten Methoden. Im Anschluss werden

Details der Durchführung vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Darstellung der gesammelten Daten und der daraus abgeleiteten Ergebnisse. Statistische Fachbegriffe werden dabei in Fußnoten kurz erläutert und können zum Beispiel in [Field, 2009] oder [Bordens und Abbott, 2002] detailliert nachgelesen werden.

Teile dieser Arbeiten wurden bereits in [Fröhlich und Wachsmuth, 2013a] und [Fröhlich und Wachsmuth, 2013b] veröffentlicht.

### 6.1. Versuchsaufbau

Bei der Durchführung einer empirischen Untersuchung sollte Wissen und Erfahrung aus anderen, verwandten Arbeiten berücksichtigt werden. In Abschnitt 2.1.2 wurden die Grundlagen der Versuchsdurchführung im Kontext der Präsenzmessung innerhalb virtueller Welten erörtert. Die These “*Ohne Objektivität keine Reliabilität, ohne Reliabilität keine Validität*” muss bedacht werden. Das zu wählende Testverfahren muss zumindest objektiv und reliabel sein. Außerdem ist eine **Kombination aus subjektiven und objektiven Messverfahren** sinnvoll. In der im folgenden beschriebenen Studie wurden darum sowohl Fragebögen eingesetzt als auch Körperreaktionen gemessen. Um aus den Daten der Körperreaktionen Informationen abzuleiten, werden stressreiche Situationen benötigt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Als virtuelle Welt für die Benutzerstudie wurde deshalb ein **virtueller Abgrund** gewählt. Der technische Aufbau entspricht dem in Kapitel 4 vorgestellten System, mit Ausnahme des Wärmesystems. Dies war zur Zeit der Evaluation noch nicht vorhanden, sondern wurde erst im Anschluss integriert.

#### 6.1.1. Interaktion und Navigation

Die Wahl einer geeigneten Interaktion und Navigation muss immer mit Rücksicht auf den jeweiligen Kontext getroffen werden. In einer realistischen Welt mit vielen Objekten wird ein Besucher häufig versuchen, ein Objekt direkt mit der Hand zu greifen, und erwarten, dass das Objekt sich genauso verhält wie in der Realität. Er transferiert dabei sein Wissen aus alltäglichen Situationen in die virtuelle Welt. Dies motiviert eine intuitive Interaktion (vgl. Kapitel 4.4). Im Rahmen der durchgeführten Studie wurde eine gestenbasierte Interaktion mittels Datenhandschuhen mit taktilem Feedback eingesetzt. Die implementierte Gesteninteraktion benötigt ein Training, indem die Versuchsteilnehmer mehrere Gesten trainieren mussten. Möglich waren im Anschluss Greifen, Zeigen,

Finger abspreizen und eine Ruheposition.

Bei der Wahl des Navigationsverfahrens sind zudem einige technische Einschränkungen zu beachten. Ein großer Nachteil ist das Auftreten von “Simulator Sickness”<sup>1</sup>. Dieses Phänomen ist je nach Person unterschiedlich stark ausgeprägt, aber es gibt Faktoren (beispielsweise sehr hohe Geschwindigkeit), die das Auftreten begünstigen. Im schlimmsten Fall wird den Besuchern so schlecht, dass sie die virtuelle Welt umgehend verlassen müssen. Im Folgenden werden vier häufig eingesetzte Verfahren erläutert:

1. **Reales Laufen** erfordert einen gesicherten, großen Raum, in dem der Besucher herumlaufen kann. Diese Methode bietet eine natürliche Navigation, ist in der Handhabung aber schwierig. Ein genügend großer Raum muss zur Verfügung stehen und mit einem Trackingsystem ausgestattet werden. Außerdem sind Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen, da der Besucher seinen eigenen Körper nicht sehen kann. Abbildung 6.1(a) zeigt eine beispielhafte Installation.
2. Durch die Fortbewegung auf einem **Laufband** können große Strecken zurückgelegt werden, aber meist nur in eine Richtung. Im Rahmen von virtuellen Welten wurden einige Ansätze für sogenannte “omnidirektionale Laufbänder” entwickelt. Abbildung 6.1 (b) zeigt ein sehr großes Laufband, das den Besucher immer wieder in die Mitte bringt. Abbildung 6.1 (c) zeigt eine Kugel, in der der Mensch wie in einem Hamsterrad läuft. Da diese Geräte viel Platz benötigen, lassen sie sich am besten mit einem Head-Mounted-Displays kombinieren.
3. **Laufen auf der Stelle** (engl.: Walking in Place) lässt sich in jedes Setup mit Trackingsystem leicht integrieren. Zur Realisierung müssen die Füße des Probanden mit entsprechenden Markern ausgestattet werden und auf der Stelle Schritte ausführen. Alternativ kann auch ein Eingabegerät (z.B. das Wii Balance Board) eingesetzt werden [Hilsendeger et al., 2009]. Die ausgeführten Schritte auf der Stelle werden in die virtuelle Umgebung übersetzt. Dabei ist zu beachten, dass eine Schrittlänge und die Laufrichtung zusätzlich bestimmt werden müssen. Diese Verfahren können schnell umgesetzt werden, benötigen aber eine Trainingsphase, da Besucher sich erst an die virtuellen Bewegungen gewöhnen müssen (vgl. bspw. [Usoh et al., 1999]).

---

<sup>1</sup>Besuchern wird schlecht, da die visuelle Information der Bewegung nicht zu der Körperwahrnehmung passt

## 6. EVALUATION DER AUSWIRKUNG MULTISENSORISCHER STIMULI

---

4. Die Navigation mittels eines **Eingabegerätes** entspricht der Umsetzung für viele Spielekonsolen. Abbildung 6.1(d) zeigt beispielsweise eine Umsetzung mittels getrackter WiiRemote. Ein bestimmter Knopfdruck löst eine virtuelle Bewegung aus, die Körperbewegung spielt dabei keine Rolle. Diese Klasse von Navigationsmethoden lässt sich sehr einfach realisieren und wird deswegen häufig eingesetzt.



- (a) Der Besucher kann sich durch **reales Laufen** auch virtuell fortbewegen. [Meehan et al., 2002]
- (b) Der **CyberWalk**: Ein großflächiges omnidirektionales Laufband [De Luca et al., 2009].



- (c) Die **Virtusphere**: Ein “Hamster-rad” zur Navigation in virtuellen Welten [Latypov, 2006].
- (d) Navigation mithilfe einer WiiRemote, wie sie in der AG WBS z.B. eingesetzt wird.

Abbildung 6.1.: Darstellung verschiedener Navigationsverfahren in virtuellen Welten



[Usoh et al., 1999] führten eine Studie durch, um die verschiedenen Navigationsmöglichkeiten zu vergleichen. Die Ergebnisse stellten eine eindeutige Rangfolge hinsichtlich der Realitätsnähe fest: *“Reales Laufen > Walking in Place > Eingabegerät”*. Dementsprechend wurde für die Studie auf eine Navigation mittels Eingabegerät verzichtet und ein **Walking in Place** eingesetzt. Reales Laufen ist in dem vorhandenen Setup der AG (vgl. Abschnitt 4.1) nicht praktikabel. Der Besucher wurde mit Markern an den Füßen ausgestattet, um Schritte zu detektieren. Bei markerbasierten Ansätzen sollte eine Mindesthöhe der Füße festgelegt werden, damit es nicht bei kleineren Bewegungen zu ungewollten Reaktionen kommt. Außerdem sollte die virtuelle Schrittlänge vergleichsweise kurz gewählt werden, damit eine hinreichend gute Präzision der virtuellen Bewegung möglich ist. Es ist zu beachten, dass die Bewegungsrichtung nicht über die Schritte festgestellt werden kann, dafür werden weitere Mechanismen benötigt. Da die Schritte nur auf der Stelle ausgeführt werden, ist nicht zwischen einer Vorwärts- und Rückwärtsbewegung zu unterscheiden. Die Laufrichtung wurde durch die Blickrichtung (errechnet über Headtracking) bestimmt. Somit konnte immer der gewünschte Weltausschnitt auf den drei vorhandenen Projektionsseiten angezeigt werden.

Sowohl Interaktion wie auch Navigation mussten zu Beginn von den Versuchspersonen erlernt werden. Dies geschah im Rahmen einer Trainingsphase, in der dem Teilnehmer die Funktionsweise erklärt wurde und er genug Zeit hatte, diese auszuprobieren.

### 6.1.2. Die virtuelle Umgebung

Als Testumgebung diente ein Szenario mit einem virtuellen Abgrund (im Folgenden auch als **virtual pit** bezeichnet), da durch die gezielte Präsentation eines Abgrunds Stress bei den Versuchspersonen ausgelöst wird und somit objektive Messverfahren eingesetzt werden können (vgl. auch Abschnitt 2.1.2). Die dabei präsentierte Welt ist in Abbildung 6.2 dargestellt und besteht aus zwei Räumen: einem Trainingsraum (im Bild rechts) und einen Raum mit Abgrund (im Bild links). Eine Detailabbildung befindet sich zusätzlich im Anhang B.

Die Welt ist ähnlich aufgebaut wie in vergleichbaren Experimenten (z.B. [Meehan et al., 2005]). Allerdings werden diese Studien klassischerweise mit Hilfe eines Head-Mounted Displays (HMD) durchgeführt. Im Rahmen dieser Dissertation fand die Studie in einer CAVE statt, und deshalb wurden einige Änderungen am klassischen Design vorgenommen. Der **Trainingsraum** ist größer gestaltet, um dem Besucher die Möglichkeit



Abbildung 6.2.: Die präsentierte virtuelle Welt in der Benutzerstudie. Der rechte Raum bezeichnet den möblierten Trainingsraum, während der linke Raum mit dem Abgrund zur Messung genutzt wurde.

zu geben, die Navigation ausgiebig zu testen. Der Raum ist wie ein Wohnzimmer eingerichtet und viele Details motivieren dazu, den Raum zu erkunden ohne dass es langweilig wird. Beispielsweise ist der Ausblick aus dem Fenster sehr ansprechend gestaltet, indem unterschiedliche Details erkannt werden können. Auf dem Esstisch, befinden sich Objekte die genauer inspiziert werden können, darunter ein Rubik-Würfel. In den Regalen können verschiedene Bücher und ein Radio entdeckt werden. Darüber hinaus wurden einige Objekte platziert, um die Gesten-Interaktion zu trainieren. Zunächst kann mithilfe eines Schlägels ein Gong geschlagen werden. Außerdem liegt ein Ball bereit, der gegriffen und bewegt werden kann. Die Probanden wurden zu einem gezielten Wurftraining aufgefordert, deswegen liegt eine Zielscheibe bereit.

Der **Raum mit dem Abgrund** (Pit-Raum) ist nicht möbliert, sondern besteht lediglich aus dem Abgrund mit einer umlaufenden Galerie und zwei Planken. Auf der gegenüberliegenden Seite des Eingangs befinden sich zwei geöffnete Fenster. Der Abgrund selbst ist mit einem virtuellen Glasboden bedeckt, sodass niemand hinunterfallen konnte und die Möglichkeit bestand, darüber zu laufen. Dies wurde den Probanden im Vorfeld allerdings nicht mitgeteilt und konnte nur durch Ausprobieren herausgefunden werden. Auf der Höhe der zwei Planken sind zwei Bälle platziert und auf dem Boden

des Abgrunds befindet sich eine Zielscheibe. Die Versuchspersonen bekamen die Aufgabe, erst einen (beliebigen) Ball zu holen und auf die Zielscheibe zu werfen und im Anschluss das gleiche mit dem anderen Ball zu machen. Innerhalb der virtuellen Umgebung gibt es, neben der beschriebenen visuellen Darstellung, folgende Möglichkeiten der multisensorischen Ausgabe:

**1. Physikalische Berechnung:**

- Drei Bälle (einer im Trainingsraum und zwei im Pit-Raum) können aufgehoben und geworfen werden. Sie haben Masse und Gewicht (vergleichbar mit einer Bowlingkugel) und ihre Flugbahn wird mittels der Physik-Engine berechnet (vgl. Abschnitt 4.4)
- Der Gong ist mit zwei Gelenkverbindungen an einer Halterung befestigt. Wenn er geschlagen wird, entsteht ein Vor- und Zurückschwingen, das durch den Luftwiderstand langsam verringert wird
- Der Schlägel für den Gong ist ebenfalls physikalisch simuliert

**2. Akustische Ausgabe:**

- Ein antikes Radio, das die Filmmusik von 'Zwei glorreiche Halunken' spielt
- Schrittgeräusche (Schritte auf dem Holzfußboden), die direkt mit der "Walking in Place"-Navigation gekoppelt sind
- Ein Ereignis-Klang, wenn der Gong geschlagen wird
- Aufprallgeräusche, wenn der Ball auf den Boden fällt
- Ein mechanischer Klang, wenn das Rolltor zum Pit-Raum geöffnet wird
- Atmosphärische Windgeräusche beim Eintreten in den Pit-Raum

**3. Taktile Ausgabe:**

- Die Datenhandschuhe mit taktilem Ausgabemöglichkeit an drei Fingern werden aktiviert, sobald die Hand des Besuchers die Oberfläche virtueller Objekte berührt

**4. Wind-Ausgabe:**

- Wind aus der Richtung der geöffneten Fenster im Pit-Raum

## 6.2. Versuchsdurchführung

Um den Einfluss der multisensorischen Stimuli auf die Präsenz zu messen, wurde eine Studie mit insgesamt 80 Teilnehmern durchgeführt. Die Versuchsteilnehmer wurden in vier Gruppen aufgeteilt, denen jeweils **unterschiedliche Kombinationen von Modalitäten** präsentiert wurden (vgl. Tabelle 6.1). Als Grundlage wurde allen Gruppen dieselbe grafische Welt gezeigt: ein Virtual-Pit-Szenario mit einem Trainingsraum wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Die erste Gruppe diente als Kontrollgruppe, es wurden keine weiteren Modalitäten präsentiert, nur die visuelle Welt und die physikalische Simulation der Objekte waren aktiviert. Teilnehmer in Kondition zwei und drei bekamen jeweils einen weiteren Stimulus präsentiert, akustische Ausgaben in Kondition 2 und in Kondition 3 taktiles Feedback. Der vierten Gruppe wurde die volle Kombination aus Grafik, Klang und Haptik gezeigt.

	<b>Kondition 1</b>	<b>Kondition 2</b>	<b>Kondition 3</b>	<b>Kondition 4</b>
Präsentierte Modalitäten	visuell	visuell auditiv	visuell  haptisch	visuell auditiv haptisch

Tabelle 6.1.: Präsentierte Stimuli in den vier Konditionen. Kondition 1 dient dabei als Kontrollgruppe, während die Gruppen 2, 3 und 4 unterschiedliche Kombinationen von multisensorischen Stimuli erlebt haben.

### 6.2.1. Messverfahren

Im Rahmen der Studie wurden sechs verschiedene Fragebögen in deutscher Übersetzung eingesetzt. Sie werden im Folgenden inhaltlich erläutert und befinden sich in Gänze im Anhang B.

1. Ein Fragebogen zu den **demographischen Informationen**. Der Fragebogen war selbst entworfen und diente der Erfassung von Alter, Geschlecht, dominanter Hand, visuellen Sehhilfen, Beruf, Erfahrung mit dem Computer, Zeit, die mit Computerspielen verbracht wird, und Erfahrung mit Virtueller Realität. Die so erfassten Daten dienten vor allem dazu, gleichmäßig verteilte Gruppen für die vier Konditionen zu bilden.

2. Der **Immersion Tendency** Questionnaire (ITQ), wie von Witmer und Singer 1998 [Witmer und Singer, 1998] vorgestellt (zur Theorie siehe Abschnitt 2.1.2). Da die Fähigkeit, Präsenz zu erfahren, zwischen Versuchspersonen sehr schwanken kann, wurden die so erhobenen Daten auch zur Einteilung der vier Gruppen genutzt.
3. Der **Simulator Sickness** Questionnaire [Kennedy et al., 1993] wurde vor sowie nach der Studie ausgefüllt, um die Einflüsse des virtuellen Aufenthalts auf die Gesundheit des Besuchers zu messen. Personen mit starker körperlicher Reaktion müssen zumeist von der Teilnahme ausgeschlossen werden, da ihr Unwohlsein sie davon abhält, Präsenz zu erfahren. Zusätzlich können die Daten aber auch Aufschluss über das gewählte Navigationsverfahren liefern, da die Simulator Sickness mit der Disparität von visuellen und vestibulären Eindrücken in Verbindung steht.
4. Durch die Wahl eines virtuellen Abgrunds als Versuchsumgebung wurden die zwei **Höhenangst**-Fragebögen von Cohen eingesetzt [Cohen, 1977]. Darin beschrieben sind 20 Situation, die potentiell Höhenangst auslösen. Auf einem dieser Fragebögen muss bewertet werden, wie viel Angst die Situation auslöst. Auf dem anderen wird angegeben, wie sehr man einer solchen Situation aus dem Weg gehen würde. Die Gesamtpunktzahl der Antworten ergibt ein gutes Maß für die vorhandene Höhenangst.
5. Als subjektives Maß für **Präsenz** wurde eine Version des SUS-Fragebogens [Usoh et al., 2000] eingesetzt, wie er in der Studie von [Meehan et al., 2002] vorgeschlagen wurde. Diese Version besteht aus 13 Fragen, die im Anschluss an den Versuch beantwortet werden mussten. Es werden drei unterschiedliche Themengebiete abgefragt: (1) Sieben Fragen erfassen die *Präsenz*, mit Fragen dazu, wie das Gefühl in der virtuellen Welt war, zu welchem Ausmaß die virtuelle Welt zu der dominanten Realität wurde und das Ausmaß, zu dem die virtuelle Welt als Ort (und nicht als Film oder Bild) erinnert wird. (2) Drei Fragen messen die angegebene **ease of locomotion** – also die Fähigkeit, sich ohne weiteren Aufwand in der virtuellen Umgebung zu bewegen. Die Ergebnisse können auch zur Beurteilung des implementierten Navigationsverfahrens herangezogen werden. (3) Drei weitere Fragen werden verwendet, um die angegebene **behavioral presence** zu erfassen. Dieser Wert basiert auf Studien, die indizieren, dass bestimmte Verhaltensweisen

als Antwort auf stressige Situationen innerhalb der virtuellen Welt mit der Präsenz korrelieren. Beispielsweise wird ein präsenztauglicher Besucher sich aus Reflex ducken wenn ihm ein virtueller Gegenstand entgegenfliegt, erschrecken wenn aus Versehen etwas herunterfällt und einem virtuellen Abgrund aus dem Weg gehen.

6. Zuletzt wurde ein Fragebogen mit **offenen Fragen** über die Erfahrung des Teilnehmers ausgeteilt. Darin befanden sich auch Fragen zur Evaluation des Erinnerungsvermögens, um festzustellen, an wie viele Objekte sich die Teilnehmer erinnern, insbesondere, welche Objekte auf dem Tisch lagen und wie viele Bilder an den Wänden hingen. Er enthielt außerdem fünf Multiple-Choice-Fragen, welche erfassten, wie den Versuchspersonen der Blick aus dem Fenster gefiel, ob sie die Schrittgeräusche als angemessen betrachteten, ob der Luftzug im Pit-Raum ausreichte, wie ihnen die Musik im Radio gefallen hat und welchen Zustand die Fenster im Pit-Raum hatten (geöffnet, geschlossen, gekippt, es gab keine). Darüber hinaus wurden die Teilnehmer nach ihrer Einschätzung der Größe des Trainingsraums-, sowie der Tiefe des Abgrunds gefragt. Zusätzlich standen ein paar Zeilen zur Verfügung, in denen die Teilnehmer sagen konnten, wie ihnen das Experiment gefallen hat und welche Vorschläge zur Verbesserung sie haben.

Zur Präsenzmessung wurden zusätzlich **objektive Messverfahren** eingesetzt. Dazu wurden mittels eines Sensors an den Fingern der nicht dominanten Hand Pulsfrequenz und Hautleitfähigkeit aufgenommen. Es wurde ein kabelloses Nexus-7-Gerät eingesetzt, um die Einschränkung der zusätzlichen Verkabelung so gering wie möglich zu halten. Die Daten wurden von der BioTrace Software verarbeitet. Es gab sowohl eine sekunden-genaue Anzeige der Daten als auch die Möglichkeit, diese später zur statistischen Auswertung aufzubereiten.

### 6.2.2. Versuchspersonen

Im Rahmen der durchgeführten Studie wurde im Vorfeld keine Zielgruppe festgelegt, sondern es wurde versucht, ein möglichst breites Spektrum an persönlichen Attributen der Versuchsteilnehmer zu erreichen. Die Teilnehmer wurden durch Aushänge in der Universität rekrutiert und mit Schokolade entlohnt. Dieses Vorgehen resultierte in einer sehr heterogenen Teilnehmergruppe. Versuchsteilnehmer mussten als zwingende Voraussetzungen erfüllen, dass sie weder unter stark ausgeprägter Höhenangst litten noch

bereits an einer früheren Studie in unserem Labor teilgenommen hatten und Deutsch ihre Muttersprache ist.

Alle vier Gruppen sollten möglichst ähnliche Teilnehmerstrukturen aufweisen. Da sehr viele Faktoren zu beachten waren, konnte nur darauf geachtet werden, dass es keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Gruppen gab, insbesondere in Bezug auf Geschlecht, Alter, ITQ-Score und den Score der Höhenangst-Fragebögen. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick. Für Alter, ITQ-Score und Höhenangst werden sowohl der Mittelwert wie auch die Standardabweichung (in Klammern) angegeben.

	<b>Kondition 1</b>	<b>Kondition 2</b>	<b>Kondition 3</b>	<b>Kondition 4</b>
Präsentierte Modalitäten	visuell	visuell auditiv	visuell haptisch	visuell auditiv haptisch
Teilnehmer	20	20	20	20
Männlich	12	13	13	12
Weiblich	8	7	7	8
Alter	27.9 (10.21)	28.9 (10.24)	24.3 (6.94)	30.95 (9.92)
ITQ-Score	35.90 (8.57)	33.80 (11.38)	36.3 (11.28)	34.15 (11.70)
Höhenangst	16.5 (10.13)	17.2 (14.8)	19.45 (15.01)	18.00 (17.36)

Tabelle 6.2.: Übersicht der Teilnehmerstruktur aufgeteilt in die vier Konditionen. In den unteren drei Reihen ist jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung in Klammern angegeben. ITQ-Score bezeichnet die Summe der Antworten aus dem Immersion Tendency Questionnaire. Höhenangst die Summe der Antworten der Höhenangstfragebögen (vgl. Abschnitt 6.2.1).

### 6.2.3. Ablauf

Nach einer Begrüßung durch den Versuchsleiter mussten die Teilnehmer zunächst fünf Fragebögen in einem Vorraum des VR-Labors beantworten: persönliche Daten, ITQ, Simulator-Sickness-Fragebogen und die zwei Höhenangst-Fragebögen (siehe Abschnitt 6.2.1). Bevor das VR-Labor betreten wurde, gab es einige Hinweise. Diese beinhalteten vor allem Sicherheitsaspekte und den Hinweis, dass das Experiment jederzeit abgebrochen werden kann. Es wurde erneut darauf hingewiesen, dass sie gegebenenfalls mit stressreichen Ereignissen konfrontiert werden würden. Eine kurze Erklärung über die Simulator Sickness erfolgte. Außerdem teilte der Versuchsleiter mit, dass im Vorfeld und

während des Versuchs keine Fragen zum Versuch selbst beantwortet werden und keinerlei technische Erklärung stattfinden würde.

Anschließend erfolgte die **Kalibrierung** der Marker und Gesten, um für jede Versuchsperson dieselben Bedingungen gewährleisten zu können. Dies geschah in einem zweistufigen Prozess: Zunächst wurde die Handgröße und Fingerlänge gemessen. Nach Auswahl der passenden Fingersätze für die Datenhandschuhe wurde ein Gestentraining durchgeführt. Das Ergebnis des Gestentrainings konnte überprüft werden und wurde wiederholt, falls die Gestenerkennung auf einem unzureichenden Niveau war.

Alle Teilnehmer starteten mit einer **Trainingsprozedur** von ungefähr 15 Minuten. Schritt für Schritt lernten sie hierbei, sich umzuschauen, umherzulaufen und mit Objekten in der virtuellen Welt zu interagieren. Das Training schloss einen Gang durch den gesamten Trainingsraum, das Schlagen des Gongs sowie das Werfen des Balles ein. Danach hatten sie noch ein wenig Zeit, sich selbstständig im Raum zu bewegen und das Erlernte zu festigen.

Eine kurze Unterbrechung diente der konkreten Einweisung. Dabei wurden die Teilnehmer zunächst darauf hingewiesen, dass sie ab sofort komplett alleine in den virtuellen Räumen unterwegs sein werden. Der Versuchsleiter stand nur in dringenden Notfällen helfend zur Seite und war für die Dauer des Experiments nicht sichtbar. Anschließend wurden sie gebeten, das Rolltor zu öffnen und sich in den Pit-Raum zu begeben. Dort bestand ihre Aufgabe darin, zwei virtuelle Bälle auf eine Zielscheibe auf dem Boden des Abgrundes zu werfen. Nachdem diese Aufgabe erledigt worden war, mussten sie wieder zurück in den Trainingsraum gehen und dort weitere fünf Minuten verbringen. Damit diese Zeit nicht als langweilig empfunden wurde, mussten sie sich den Raum ganz genau anschauen, um sich so viele Objekte wie möglich zu merken.

Nachdem der Teil in der virtuellen Realität abgeschlossen war, wurden den Teilnehmern wiederum Fragebögen ausgehändigt: der Simulator-Sickness-Fragebogen wie vor dem Experiment, der SUS-Präsenz-Fragebogen und der Fragebogen mit den offenen Fragen zur Erfahrung und zur Erinnerung in der virtuellen Welt. Die gesamte Prozedur dauerte ungefähr 60 Minuten pro Versuchsperson.

Abbildung 6.3 zeigt eine Versuchsperson kurz nach dem Betreten des Pit-Raums. Darunter sieht man die **Hautleitfähigkeit** über die Zeit des gesamten Versuchs, wie sie von der BioTrace Software dargestellt wird. Dabei sind vier Markierungen zu sehen, die im Verlauf des Versuchs eingefügt wurden. Markierung 1 zeigt den Zeitpunkt, zu dem das Training beendet wurde. Durch Markierung 2 wird der Moment, in dem das Rolltor ge-



öffnet und der Raum mit dem Abgrund sichtbar wurde, festgehalten. Markierung 3 zeigt den Punkt, an dem die Aufgabe erfüllt wurde und der Trainingsraum wieder betreten wurde. In dem Moment wurde das Rolltor automatisch heruntergefahren und der Raum mit dem Abgrund war nicht mehr sichtbar. Markierung 4 zeigt das Versuchsende.

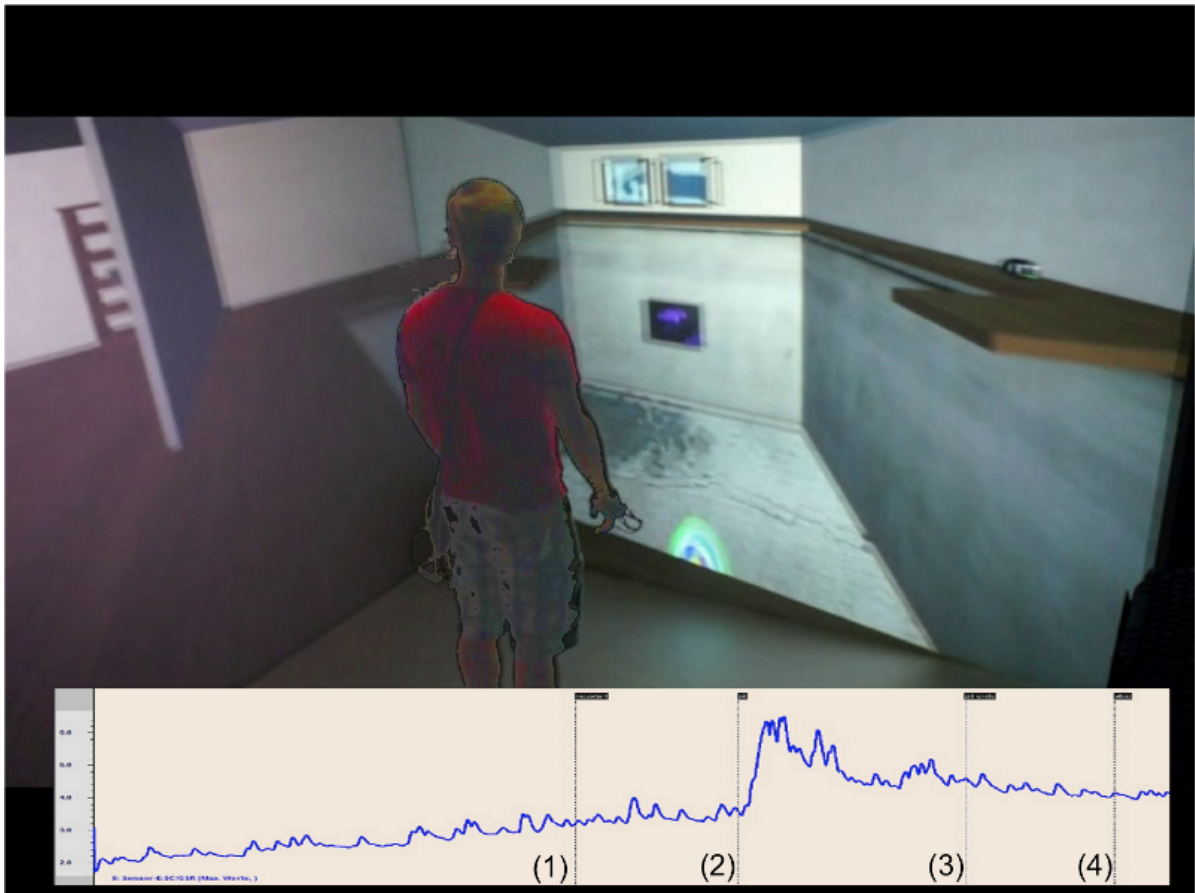


Abbildung 6.3.: Versuchsperson und ihre Hautleitfähigkeit über den gesamten Versuchsverlauf. Markierungen: (1) Ende der Trainingsphase; (2) Rolltor zum Pit-Raum öffnet sich; (3) Aufgabe im Pit-Raum erfüllt; (4) Versuchsende. Die Versuchsperson im Bild befindet sich gerade bei Markierung 2.

### 6.3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nutzerstudie vorgestellt. Da der Fokus auf der Messung von Präsenz lag, werden zunächst die Daten der objektiven und subjektiven Auswertungen vorgestellt. Anschließend erfolgt eine kurze Darstellung der weiteren erfassten Daten.

#### 6.3.1. Ergebnisse der subjektiven Präsenzmessung

Die 13 Fragen des SUS-Präsenzfragebogens werden auf einer 7-Punkt-Likert-Skala<sup>2</sup> beantwortet. [Usoh et al., 2000] schlagen vor, für die Auswertung die "high answers"<sup>3</sup> zu zählen. Wird eine solche hohe Antwort gegeben, wird die Gesamtpunktzahl um 1 erhöht. Mit dem Verfahren kann somit aus 13 Fragen eine Maximalpunktzahl von 13 erreicht werden. Durch die in Abschnitt 6.2.1 erläuterte Unterteilung der Fragen in Präsenz (sieben Fragen), "Behavioral" (drei Fragen), und "Ease of Locomotion" (drei Fragen), stellt die Maximalpunktzahl die Anzahl der Fragen dar. Die Auswertung des Fragebogens erfolgte entsprechend.

Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse für die vier Konditionen. Eine **Varianzanalyse** (ANOVA)<sup>4</sup> zeigte hoch signifikante Unterschiede für Präsenz (Welch's  $F(3, 40.39) = 8.893$ ,  $p < .001$ ). Um festzustellen, welche Gruppen sich signifikant unterscheiden, werden Post-Hoc-Tests durchgeführt. Bonferroni's<sup>5</sup> Post-hoc-Vergleich zeigte, dass Teilnehmer der Kondition 2 (visuell & auditiv) ( $M = 4.00$ ,  $SD = 2.03$ ,  $CI[3.05, 4.95]$ ) sowie Teilnehmer der Gruppe 3 (visuell & taktil) ( $M = 3.71$ ,  $SD = 1.31$ ,  $CI[3.12, 4.31]$ ) die Präsenz signifikant schlechter bewertet haben als Teilnehmer in Kondition 4 (alle Modalitäten) ( $M = 6.20$ ,  $SD = 0.89$ ,  $CI[5.78, 6.62]$ ),  $p < .001$ . Kondition 1 (nur visuell) wurde ebenfalls schlechter bewertet ( $M = 4.65$ ,  $SD = 2.16$ ,  $CI[3.64, 5.66]$ ) bei einem Signifikanzniveau von  $p < .05$ . Die Ergebnisse für die **behavioral presence** haben eine

---

<sup>2</sup>(benannt nach Renise Likert) bezeichnet eine Antwortskala, bei der die sieben Antwortmöglichkeiten von Negativ (-3) über neutral (0) zu positiv (+3) reichen. Der Abstand der Antwortmöglichkeiten zueinander muss möglichst gleich sein (Äquidistanz) und reicht häufig von "Trifft gar nicht zu" bis "Trifft voll zu"

<sup>3</sup>high answer (zu Deutsch: hohe Antwort), bezeichnet die Top-3-Antworten auf einer 7-Punkt-Likert Skala

<sup>4</sup>ANOVA (engl. analysis of variance) ermöglicht den Vergleich der Mittelwerte von mehr als zwei Gruppen (im Gegensatz zu t-tests)

<sup>5</sup>Ein Post-Hoc Test, der das Signifikanzniveau korrigiert und somit eine Kumulation der Fehler erster Art ( $\alpha$ -Fehler) vermeidet

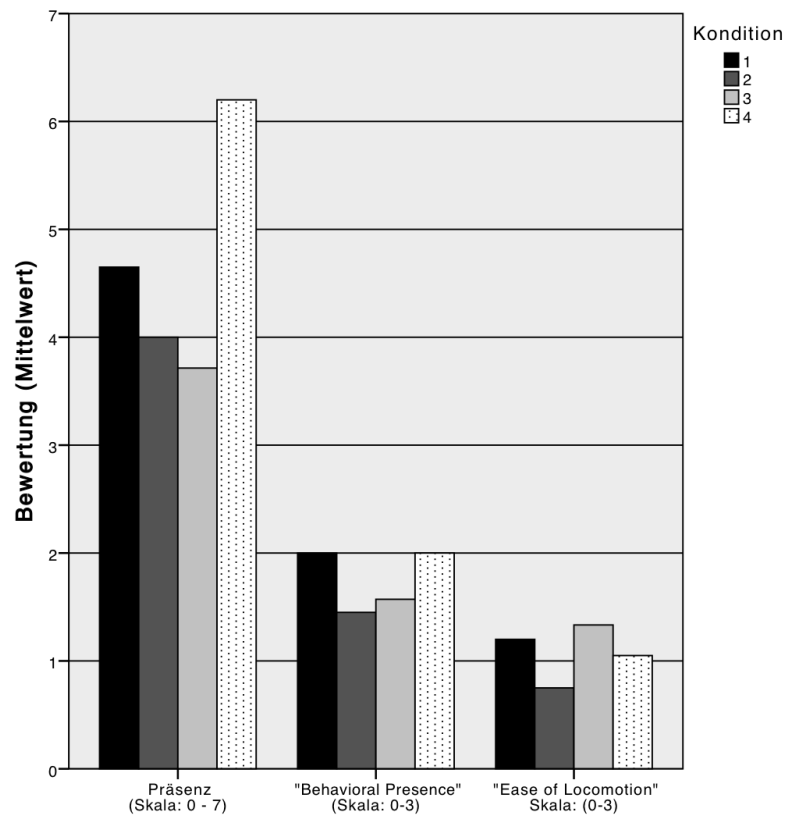


Abbildung 6.4.: Die Mittelwerte der erfassten Daten aus dem verwendeten Präsenzfragebogen in den drei Kategorien (Präsenz, Behavioral Presence und Ease of Locomotion). Details zur Auswertung finden sich im Text.

ähnliche Struktur, sind aber nicht signifikant. Alle Konditionen hatten das gleiche Navigationsverfahren, und somit gab es keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung der Navigation (**Ease of Locomotion**).

Im Gesamten sind die Ergebnisse insbesondere für Kondition 4 als sehr gut zu bezeichnen. Ein Mittelwert von 6.2 (bei einem Maximalwert von 7) zeigt eine sehr hohe Bewertung. Abbildung 6.5 zeigt die Bewertung für die einzelnen Fragen aufgeschlüsselt.

## 6. EVALUATION DER AUSWIRKUNG MULTISENSORISCHER STIMULI

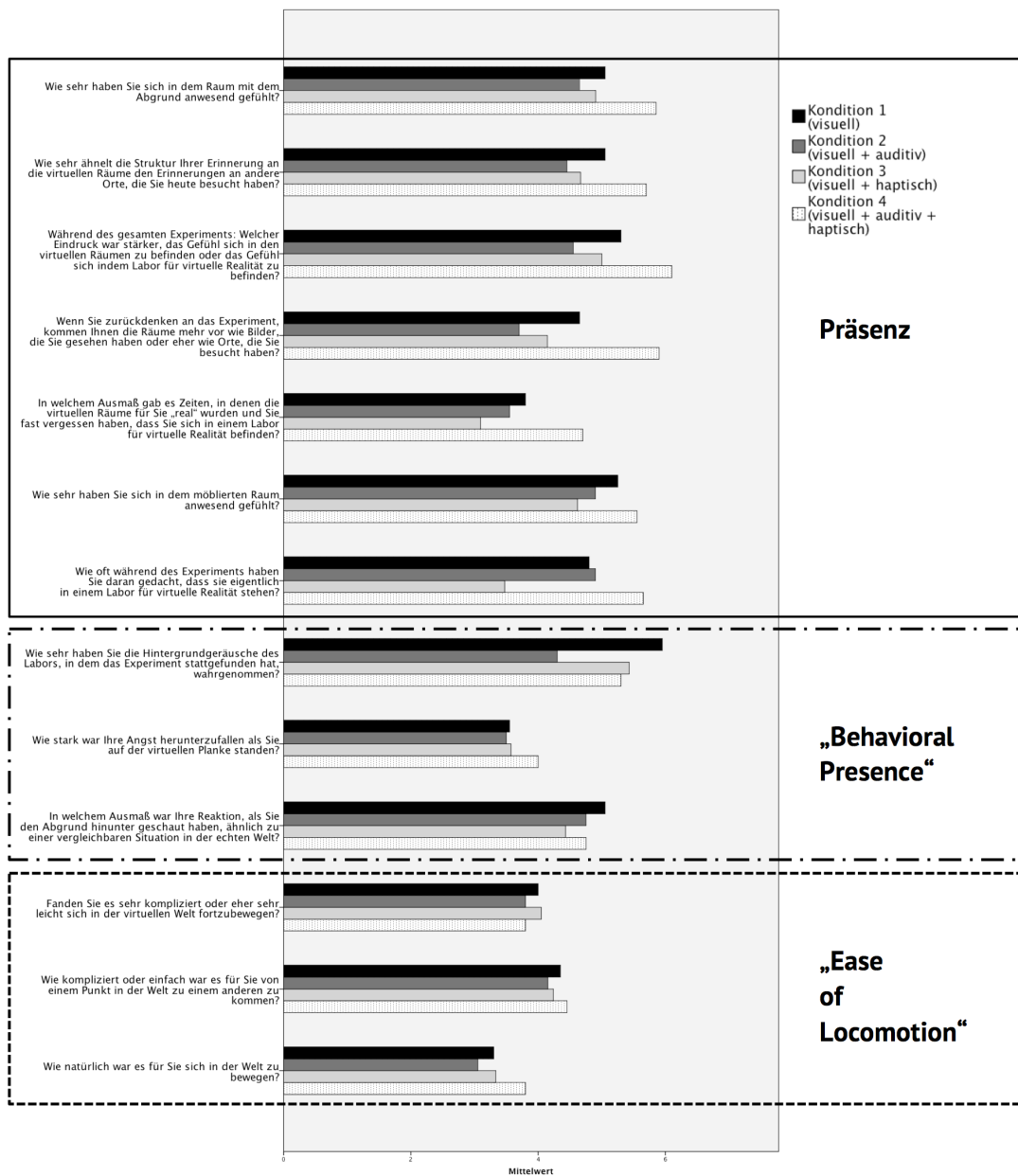


Abbildung 6.5.: Die Mittelwerte der Antworten auf die 13 Fragen des verwendeten Präsenzfragebogens (SUS) aufgeteilt in die drei Kategorien Präsenz, "Behavioral Presence" und "Ease of Locomotion". Nähere Erläuterungen finden sich im Text.

### 6.3.2. Ergebnisse der objektiven Präsenzmessung

Die gleichen Analysen wie für die subjektiven Messungen wurden für die Daten der **Biosensoren** durchgeführt. Die Ergebnisse von sechs Teilnehmern waren leider unbrauchbar, da das technische Equipment ausgefallen war. Sie wurden aus der Analyse entfernt. Abbildung 6.6 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Herzrate für die vier Konditionen. Der erste Punkt (Prä Pit) bezeichnet dabei den Mittelwert aus der gesamten Trainingsphase. Die zweite Markierung (Pit) ist der Mittelwert der Messung von dem Zeitpunkt, zu dem das Rolltor zum Pit-Raum geöffnet wurde, bis zu dem Zeitpunkt, an dem beide Bälle geworfen wurden und das Rolltor wieder geschlossen wurde. Punkt 3 (Post Pit) bezeichnet die fünf Minuten, die die Teilnehmer im Anschluss noch in dem Trainingsraum verbringen mussten.

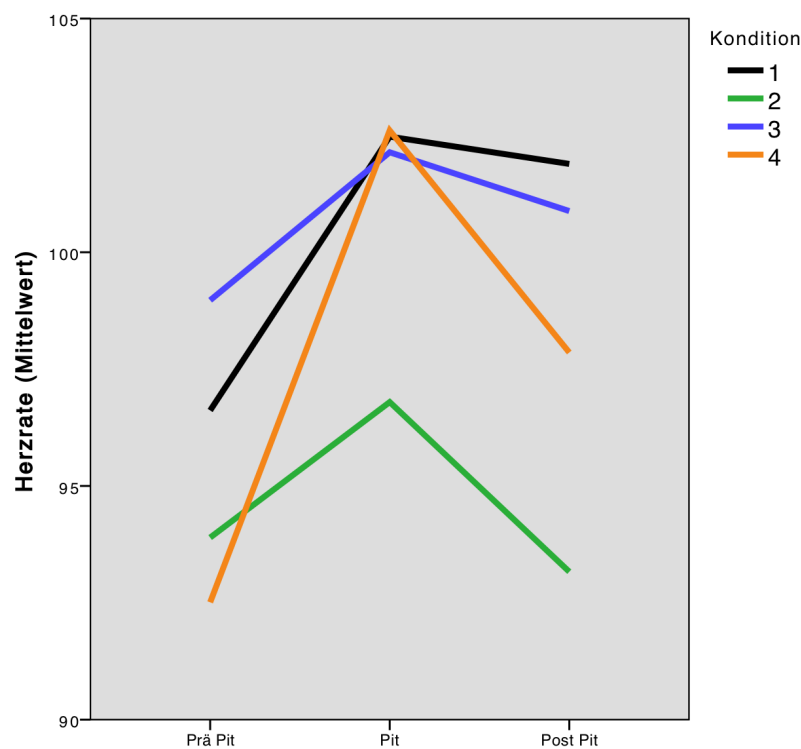


Abbildung 6.6.: Der Puls (Mittelwert) in den vier Konditionen. Es ist zu erkennen, dass es in dem Raum mit dem Abgrund in allen vier Konditionen zu einer deutlich erhöhten Herzrate kommt. Dieser Anstieg ist für Kondition 4 signifikant höher.

X-Achse: **Prä Pit** gibt den Mittelwert während der Trainingsphase, **Pit** den Mittelwert der Zeit in dem Raum mit Abgrund und **Post Pit** den Mittelwert der Zeit nach dem Raum mit dem Abgrund an.

## 6. EVALUATION DER AUSWIRKUNG MULTISENSORISCHER STIMULI

Mittels einer ANOVA konnten signifikante Ergebnisse für den Anstieg von Prä Pit zu Pit ( $F(3, 70) = 4.1, p < .05$ ) gefunden werden. Eine Bonferroni-Post-Hoc-Analyse der vier Gruppen zeigt, dass der Anstieg der **Herzrate** in Kondition 4 ( $M = 10.1, SD = 8.57, CI[5.97, 14.22]$ ) signifikant höher war als in Kondition 2 ( $M = 2.89, SD = 4.22, CI[0.87, 4.93]$ ),  $p < .05$  und Kondition 3 ( $M = 3.17, SD = 4.66, CI[0.85, 5.48]$ ),  $p < .05$ . Die Ergebnisse für die Hautleitfähigkeit zeigen einen ähnlichen Trend, waren aber bis zu einem Signifikanzniveau von  $p < .05$  nicht signifikant.

Betrachtet man nun die subjektiven und objektiven Messungen gemeinsam, zeigt sich eindeutig, dass die Kondition 4 (mit allen Modalitäten) signifikant besser bewertet wurde als die Konditionen 2 und 3 und auch zu Kondition 1 war eine deutliche Verbesserung zu sehen. Tabelle 6.3 gibt noch einmal alle Daten im Überblick an, wobei die Mittelwerte und die Standardabweichung (in Klammern) angegeben sind. Für Herzrate und Hautleitfähigkeit wurde der errechnete Anstieg (in Prozent) von Training zum Abgrund gemessen. Signifikante Werte wurden mit Sternchen markiert ( $* = p < .05$ ;  $** = p < .01$ ).

	Kondition 1	Kondition 2	Kondition 3	Kondition 4
Präsentierte Modalitäten	visuell	visuell auditiv	visuell haptisch	visuell auditiv haptisch
Präsenz	4.65 (2.16)	4.00** (2.02)	3.71** (1.31)	6.2** (1.91)
Behavioral Presence	2,00 (0.86)	1.45 (0.89)	1.57 (0.87)	2.00 (1.03)
Ease of Locomotion	1.2 (1.15)	0.75 (0.91)	1.33 (1.11)	1.05 (1.15)
Erhöhung der Herzrate (in %)	5.85 (9.63)	2.90* (4.22)	3.17* (4.66)	10.10* (8.57)
Erhöhung der Hautleitfähigkeit (in %)	3.22 (2.51)	2.52 (1.66)	1.73 (1.04)	3.21 (3.11)

Tabelle 6.3.: Daten der verschiedenen Präsenzmessungen im Überblick. Es werden Mittelwerte und die Standardabweichung (in Klammern) angegeben. Für Herzrate und Hautleitfähigkeit wurde der errechnete Anstieg (in Prozent) vom Training zum Abgrund gemessen. Signifikante Werte wurden mit Sternchen markiert ( $* = p < .05$ ;  $** = p < .01$ ).

### 6.3.3. Weitere Ergebnisse

Zusätzlich wurden einige **Korrelationsanalysen** durchgeführt. Auch in dieser Studie konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Immersionstendenz (gemessen an der Gesamtpunktzahl des ITQ-Fragebogens) und der Präsenz ( $r = .24, p < 0.05$ ), sowie behavioral presence ( $r = -.29, p < 0.05$ ) gemessen werden. Außerdem korrelierte die behavioral presence mit dem Geschlecht der Teilnehmer (negativ für männliche Versuchspersonen ( $r = -.32, p < 0.01$ )) – Frauen haben ein höheres Ergebnis. Die Zeit, die mit Computerspielen verbracht wird, korreliert stark mit dem Geschlecht (positiv für Männer ( $r = .25, p < 0.05$ )). Allerdings hatte dieser Wert keinen Einfluss auf die späteren Ergebnisse der gemessenen Präsenz (objektiv sowie subjektiv). Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass Versuchspersonen mit Vorerfahrung in VR besser mit der Navigation zurecht gekommen sind (ease of locomotion) ( $r = -.22, p < 0.05$ ). Alle weiteren vorab ermittelten Werte hatten keine signifikante Korrelation mit der Präsenz. Überraschend ist, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Höhenangst und der gemessenen Präsenz gab.

In Abschnitt 6.1.2 wurde bereits erwähnt, dass es nicht möglich war, den Abgrund hinunterzufallen. Im Prinzip hätte jeder Versuchsteilnehmer darüber laufen können und wäre so schneller fertig gewesen. Eine Auswertung der Videoaufnahmen zeigte, dass nur vier Versuchspersonen (von 80) dies ausprobiert haben, alle anderen sind den Umweg gegangen. Weitere Videoanalysen (die aufgrund ihres Umfang in der vorliegenden Dissertation nicht durchgeführt werden konnten) sind wünschenswert, insbesondere, um weitere Reaktionen zu analysieren und genaueren Aufschluss über die **behavioral presence** zu erlangen.

## 6.4. Interpretation

Die oben erfolgte Auswertung legt nahe, dass die Inklusion von weiteren Ausgabemodalitäten nicht zwingendermaßen zu einer erhöhten wahrgenommenen Präsenz führt. In dieser Studie neigten Teilnehmer dazu, die Präsenz niedriger zu bewerten, wenn ihnen nur ein zusätzlicher Stimulus (Audio oder Haptik) präsentiert wurde. Auch die Auswertung der physiologischen Daten, als objektives Maß, unterstützt diese Beobachtung. Wurde hingegen die vollständige Kombination von multisensorischen Stimuli eingebunden, war die Präsenz deutlich höher. Die von [Dinh et al., 1999] aufgestellte Hypothese

## 6. EVALUATION DER AUSWIRKUNG MULTISENSORISCHER STIMULI

der additiven Verstärkung kann durch diese Daten nicht belegt werden.

Betrachtet man die graphische Datendarstellung (siehe Abb. 6.4), lässt sich ein Tal erkennen, wenn nur eine zusätzliche Modalität präsentiert wird. Ein vergleichbares Phänomen wurde auch in der Robotik-Domäne festgestellt, von Masahiro Mori ([Mori, 1970]<sup>6</sup>, [Mori et al., 2012]<sup>7</sup>). Er gab dem Phänomen den Namen **“uncanny valley”**<sup>8</sup>. Bei Robotern kann beobachtet werden, dass sie von dem menschlichen Interaktionspartner abgelehnt und als unheimlich empfunden werden, wenn ihr Aussehen und Handeln dem eines Menschen sehr nahe kommt, aber nicht perfekt ist. Erst wenn eine kritische Grenze überschritten wurde und der Roboter “gut” genug ist, steigt die Akzeptanz der Nutzer wieder. Abbildung 6.7 zeigt die ursprüngliche Feststellung von Mori. Dabei traf er eine Unterscheidung zwischen sich bewegenden (gestrichelte Linie) und ruhenden (durchgängige Linie) Robotern. Im rechten Drittel ist das “uncanny valley” zu sehen, dort wirken die präsentierten Roboter wie Zombies oder Leichen – eine **ablehnende Haltung** entsteht. Ziel vieler Forscher im Bereich der humanoiden Robotik ist es seit jeher, dieses Tal zu überwinden (siehe beispielsweise [Walters et al., 2008], [Bartneck et al., 2007]). [Brenton et al., 2005] beschreiben zudem einen ähnlichen Effekt für virtuelle Charaktere. Somit kommt das unheimliche Tal auch in anderen Domänen vor.

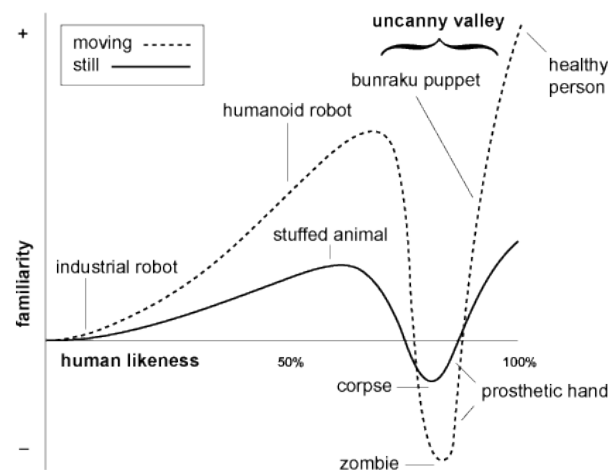


Abbildung 6.7.: Das unheimliche Tal (“uncanny valley”) nach [Mori et al., 2012].

<sup>6</sup>original auf Japanisch

<sup>7</sup>englische Neuveröffentlichung

<sup>8</sup>zu deutsch: unheimliches Tal



Eine mögliche Interpretation der hier vorgestellten Daten ist somit ein **uncanny valley in der virtuellen Realität**. Betrachtet man die Daten, kann ein ähnliches Tal bei den Konditionen 2 und 3 erkannt werden. Das könnte aus der erhöhten Erwartungshaltung der Versuchsteilnehmer resultieren, denn aufgrund der allgemeinen Verfügbarkeit multimedialer Technik sind die Menschen an eine multisensorische Präsentation gewöhnt. Als [Dinh et al., 1999] ihre Studie durchführten, waren diese Techniken noch nicht in allen Haushalten verfügbar und somit generelles Neuland für die Versuchspersonen. Da aber aktuelle Spielekonsolen schon Grafik, Sound und Haptik präsentieren können, ist die Erwartungshaltung der Versuchspersonen eine andere. Wenn ihnen nur ein weiterer Stimulus präsentiert wird, sind sie eher enttäuscht und lehnen die virtuelle Welt ab. Wird hingegen die volle Breite an multisensorischer Stimulation ausgeschöpft, kann das Tal überwunden werden. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass die Erweiterung von virtuellen Welten um multisensorische Stimuli nicht (oder nicht mehr) in einer einfachen additiven Weise funktioniert, sondern **möglichst viele Sinne** angesprochen werden sollten. Daraus resultierte auch die zusätzliche Anbindung eines Wärmesystems, wie in Abschnitt 4.5.3 erläutert.

## 6.5. Diskussion

Die durchgeführte Benutzerstudie sollte Aufschluss über die Auswirkung von multisensorischen Stimuli auf die Präsenz der Besucher virtueller Welten liefern. Es wurde eine Benutzerstudie mit insgesamt 80 Versuchsteilnehmern durchgeführt, die in vier Gruppen eingeteilt wurden. Jeder Gruppe wurde eine unterschiedliche Kombination der generierten multisensorischen Stimuli präsentiert. Die Ergebnisse in Bezug auf das einleitend gesetzte Teilziel und die damit verbundenen Anforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

**Teilziel 3** Durchführung einer Evaluation zur Beurteilung der Auswirkung von multisensorischen Stimuli auf die Bewertung der virtuellen Welt durch Besucher.

- (✓) **Gütekriterien** Die Auswahl der Messverfahren sowie der Versuchsaufbau wurden anhand der drei Gütekriterien für psychologische Tests getroffen. Die Objektivität und Reliabilität können angenommen werden. Es konnte nur eine interne Abschätzung der Validität erfolgen, die aufgrund der Vergleichbarkeit des Versuchsaufbaus (s.u.) ebenfalls positiv ausfällt.

- ✓ **Vergleichbarkeit** Das Design der Studie entspricht der gängigen Versuchspraxis für Präsenzmessungen. Die Auswahl eines Virtual-Pit-Szenarios ermöglichte den Einsatz von objektiven Messungen. Da aber in den meisten vergleichbaren Studien mit einem HMD und lokalen Geräten getestet wurde, kann die Frage der Vergleichbarkeit in diesem Punkt nicht vollständig beantwortet werden. Die Integration in die Hauptstudie hätte zu einer doppelten Anzahl der Versuchspersonen geführt und wäre somit nicht praktikabel gewesen. Im Rahmen seiner Bachelorarbeit führte [Meerhoff, 2013] eine Evaluation zwischen CAVE und HMD durch. Es wurde ebenfalls ein Virtual-Pit-Szenario präsentiert. Die Datenerhebung erfolgte ausschließlich über den SUS-Präsenzfragebogen. Es wurden 5 Personen pro Kondition getestet und es konnten keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung gefunden werden. Dennoch sollte in Zukunft in einer größer angelegten Studie genauer untersucht werden, um eine abschließende Aussage über die Vergleichbarkeit treffen zu können.
- ✓ **Nützlichkeit** Die Ergebnisse haben vielerlei Aufschluss über die Perzeption von multisensorischen Stimuli und ihre Auswirkung auf die Präsenz geliefert. Verwandte Arbeiten können davon profitieren und die Interpretation der Daten mit einem uncanny valley eröffnet weitere interessante Fragen für zukünftige Studien.

Wünschenswert wäre die Einbettung von Wärme in einer vergleichbaren Studie. Dies konnte hier nicht vorgelegt werden, weil das Wärmesystem erst im Anschluss entwickelt wurde und ein systematisches Nachtesten den Umfang der vorliegenden Dissertation überstiegen hätte. Die Entwicklung des Wärmesystems wurde in ein Masterprojekt ausgegliedert (vgl. Abschnitt 4.5.3) und kleinere Teilevaluationen des Wärmesystems wurden durchgeführt [Hülsmann et al., 2014]. Eine vergleichende Evaluation aller Modalitäten (Bild, Ton, Haptik, Wind und Wärme) bleibt zukünftiger Arbeit vorbehalten.

# INTEGRATION EINES AUTONOMEN AGENTEN

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Entwicklung und Evaluation eines Systems zur Generierung multisensorischer Stimuli beschrieben. Eine Benutzerstudie belegt, dass die Präsenz der Besucher erhöht werden konnte und die Besucher stärker in die virtuelle Welt integriert wurden. Wie in Abschnitt 2.1.1 bereits eingeleitet, ist nach [Zeltzer, 1992] aber eine zusätzliche Integration von Autonomie erforderlich, um eine wirkliche Virtuelle Realität zu schaffen. Das folgende Kapitel erörtert, wie **autonome Agenten** in eine virtuelle Welt integriert werden können, um die Präsenz der Besucher zu erhöhen.

Zunächst wird die Motivation zur Integration eines autonomen virtuellen Agenten anhand des Zeltzer-Würfels dargelegt. Anschließend wird kurz in das Themengebiet der virtuellen Menschen eingeführt, bevor dieses an dem Beispiel des Agenten MAX vertieft wird. Ein Beispielszenario, in dem MAX als autonomer Agent fungiert und den Besucher begleitet, wird beschrieben. Dieses Szenario sollte empirisch untersucht werden, um Aufschlüsse über den Einfluss eines autonomen Agenten auf die Präsenz der Besucher zu bekommen. Zum Abschluss wird ein Versuchsaufbau vorgestellt und die mögliche Integration des virtuellen Agenten in das vorgestellte wissensbasierte Framework (vgl. Kapitel 5) besprochen. Teile dieser Arbeit werden in [Fröhlich und Wachsmuth, 2014] vorgestellt.

## 7.1. Motivation

Abbildung 7.1 veranschaulicht den in Abschnitt 2.1.1 ausführlich besprochenen AIP-Würfel nach [Zeltzer, 1992], wobei der bisherige Arbeitsfortschritt skizziert wird. Von den drei Achsen Autonomie, Interaktion und Präsenz konnte mit den in Kapitel 4 beschriebenen technischen Erweiterungen eine Verbesserung auf der Präsenzachse erzielt werden. Die Wahl eines natürlichen Interaktionsverfahrens mit einer angebundnen Physik-Engine kann zudem als Fortschritt auf der Interaktionsachse gesehen werden. Im Bild ist dies durch eine kleine Fläche gekennzeichnet, da eine exakte Bestimmung von Punkten nach der Definition des AIP-Würfels nicht möglich ist. Er eignet sich aber gut, um zwei Systeme (hier: vor den Arbeiten, die in Kapitel 4 beschrieben wurden, und danach) zu vergleichen. Es wurden somit Verbesserungen auf den Achsen Interaktion und Präsenz vorgenommen. Nach Zeltzer kann so aber nur ein Schritt in Richtung  $(0,1,1)$  gegangen werden – **die dritte Dimension** (Autonomie) wird erst eine wirkliche virtuelle Realität ermöglichen.

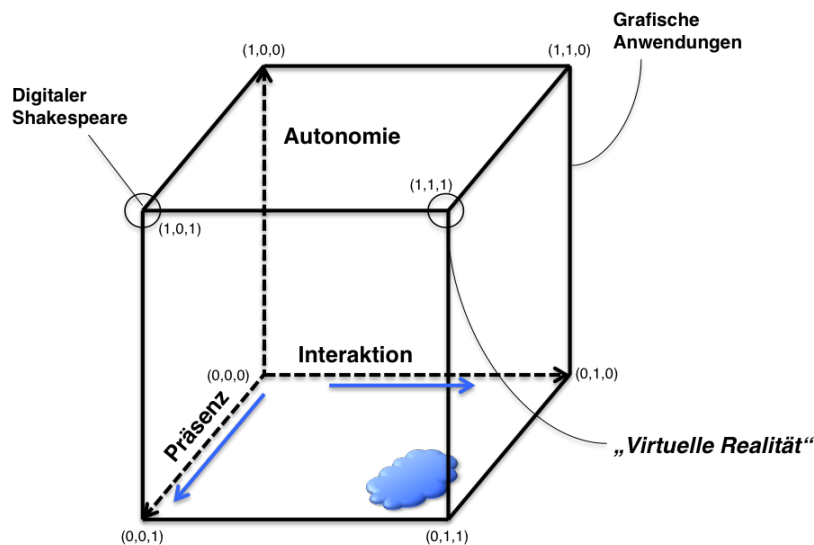


Abbildung 7.1.: Illustration der geleisteten Arbeiten als Wolke (vgl. Text). Die Integration eines autonomen Agenten ist nach [Zeltzer, 1992] eine weitere Dimension, um eine virtuelle Realität (Punkt  $(1,1,1)$ ) zu erreichen.

Um der Achse Autonomie gerecht zu werden, muss die virtuelle Welt sozusagen mit Leben gefüllt werden. Dies kann durch einfache **virtuelle Lebewesen** (z.B. Vögel oder Fische) geschehen, aber Zeltzer selbst beschrieb den Punkt (1,0,0) als:

*“[...] einen hochentwickelten, physikalisch basierten virtuellen Agenten.”*<sup>1</sup>

Somit scheint es erstrebenswert, die Integration eines autonomen virtuellen Agenten in das vorhandene System zu forcieren. Im Folgenden soll nun ein kurzer Überblick zum Stand der Technik in diesem Bereich gegeben werden, um im Anschluss eine prototypische Realisierung vorzustellen.

### 7.1.1. Virtuelle Agenten

Die Einsatzgebiete von virtuellen Agenten sind vielfältig. Beispielsweise werden sie in Trainingsszenarien eingesetzt, oder dienen als **antropomorphe Kommunikationschnittstelle** zwischen dem Anwender und dem System. Der Besucher kann dabei dem Agenten Anweisungen erteilen, die dieser für ihn ausführt, und Instruktionen von dem Agenten erhalten. Die Agenten müssen dabei nicht zwangsläufig menschenähnlich verkörpert sein, sondern können auch abstraktere Darstellungsformen haben oder gänzlich ohne einen Körper realisiert werden. Ein frühes Beispiel eines virtuellen Agenten, der nur textuell repräsentiert war, ist bei [Weizenbaum, 1966] zu finden. Das dort entwickelte ELIZA-System ermöglichte Kommunikation zwischen Mensch und Maschine mittels natürlicher Sprache. Ein aktuelles Beispiel für den Einsatz virtueller Agenten stellen [Kramer et al., 2013] vor. Hier wird die Akzeptanz virtueller Agenten zu Therapiezwecken älterer Menschen oder Menschen mit Behinderung untersucht.

Mit der Erforschung humanoider virtueller Agenten befasst sich zum einen die Computergrafik, die versucht, immer realistischere virtuelle Agenten zu erschaffen ([Brenton et al., 2005], [Jung et al., 2009] u.v.m.). Neben der grafischen Darstellung sollte sich ein virtueller Agent so natürlich wie möglich verhalten. Um Anhaltspunkte zu bekommen, was einen glaubwürdigen Agenten ausmacht, stellte [Loyall, 1997] **Reaktivität, Selbstmotivation und Ziele** als Kernaspekte auf. Dazu kommen noch Faktoren wie begrenzte Ressourcen, Situiertheit und breitgefächerte Kompetenzen.

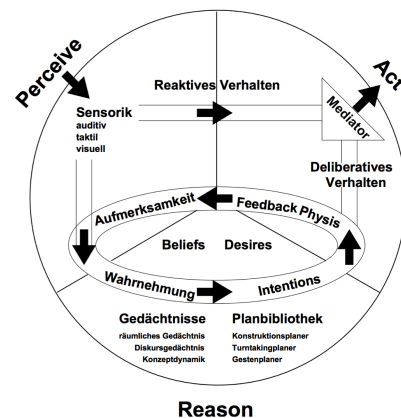
---

<sup>1</sup>Übersetzt aus dem Englischen ([Zeltzer, 1992](Seite 127))

## 7. INTEGRATION EINES AUTONOMEN AGENTEN

[Bratman, 1987] stellte ein Modell vor, dass den meisten Ansprüchen gerecht wird: das **Belief-Desire-Intention-Modell** (kurz: BDI<sup>2</sup>). Dabei stehen die Beliefs für das Wissen des Agenten über die Welt (Faktenwissen), während Desires die Grundbedürfnisse, die ein Agent erfüllen möchte, beinhalten. Diese können auch als Langzeit- oder Fernziele verstanden werden. Intentions hingegen sind konkrete Vorhaben, die die Wahl der aktuellen Handlungen maßgeblich beeinflussen, wenn sie einmal von einem Agenten festgelegt wurden. Dieses Modell wird häufig eingesetzt, um ein glaubwürdiges Verhalten für virtuelle Agenten zu realisieren.

In der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme (Künstliche Intelligenz) wird auch an humanoiden Agenten geforscht. Dabei entstand **MAX – ein Multimodaler Assembly eXpert**. Als Gesprächspartner hat er zwei große Einsatzorte. Er ist Museumsführer in Deutschlands größtem Computermuseum in Paderborn [Kopp et al., 2005] (siehe Abbildung 7.2(a)), und interagiert mit vorbeilaufenden Personen in einer Dauerinstallation auf dem Flur der AG WBS [Jung und Kopp, 2003]. MAX liegt eine hybride BDI-Architektur zugrunde, die in Abbildung 7.2(b) skizziert ist. Weitere Arbeiten in der AG WBS haben zu einem sehr natürlichen Interaktionspartner geführt. Insbesondere kann MAX natürlich kommunizieren, indem er realistische Sprach- und Gestenausgaben synchron generiert [Kopp, 2003] und emotionale Reaktionen zeigt [Becker-Asano, 2008].



(a) Der virtuelle Mensch MAX arbeitet als Museumsführer [Kopp et al., 2005] (b) Architektur von MAX [Wachsmuth und Leßmann, 2002]

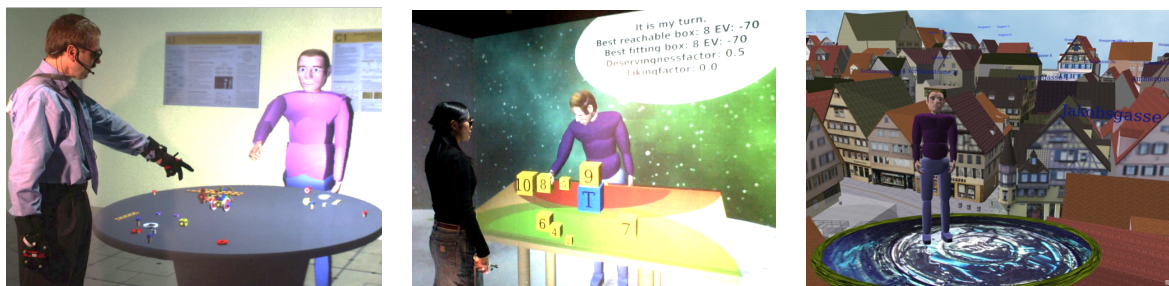
Abbildung 7.2.: Der virtuelle Agent MAX und seine zugrunde liegende Architektur.

<sup>2</sup>zu Deutsch in etwa: Weltwissen, Ziele, Absichten

**Autonome Agenten in virtuellen Welten** In virtuellen Welten werden autonome Agenten häufig antropomorph verkörpert. Sie dienen dem Besucher beispielsweise als Gesprächspartner oder Assistent in Konstruktionsszenarien und speziellen Trainingsanwendungen. Virtuelle Agenten können zum Beispiel für das Training schwieriger Situationen eingesetzt werden. [Baur et al., 2013] stellen eine Anwendung vor, in der ein Bewerbungsgespräch mit einem virtuellen Agenten in der Rolle des potentiellen Arbeitgebers trainiert werden kann.

MAX hat schon in unterschiedlichen virtuellen Welten als **Interaktionspartner** fungiert. Abbildung 7.3 zeigt drei beispielhafte Anwendungsfelder: (a) [Kopp et al., 2003] wurde ein Interaktionsszenario entwickelt, in dem ein virtuelles Flugzeug aus Baufix<sup>3</sup>-Teilen zusammen mit MAX konstruiert werden konnte. (b) [Nguyen, 2012] entwickelte ein virtuelles Körperschema und testete die Umsetzung eines peripersonalen Raums in einem virtuellen Szenario. Der Besucher und MAX wollen gemeinsam einen Turm bauen und sind dabei auf gegenseitige Unterstützung angewiesen. (c) In dem Projekt “May I guide you” wurde MAX als Stadtführer im virtuellen Tübingen eingesetzt [Rabe und Wachsmuth, 2013].

In den folgenden Abschnitten wird ein Anwendungsbeispiel beschrieben, in dem MAX mit den multisensorischen Stimuli kombiniert wird. Dabei soll auch erörtert werden, wie das in Kapitel 5 vorgestellte Softwareframework dabei helfen kann und wo die zukünftigen Herausforderungen und Chancen dieser Integration liegen.



(a) MAX beim Bauen eines Baufix-Flugzeugs [Pfeiffer-Lefmann, 2010] (b) MAX beim Turmbau [Nguyen, 2012] (c) MAX als Stadtführer im virtuellen Tübingen [Rabe und Wachsmuth, 2013]

Abbildung 7.3.: MAX in drei verschiedenen Anwendungsbeispielen innerhalb virtueller Welten.

<sup>3</sup>Ein Konstruktionsspielzeug, bei dem aus verschiedenen Holzleisten und Verbindungsteilen komplexe Objekte zusammengesetzt werden können

### 7.2. MAX als Laborführer – Ein Beispielszenario

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Anwendungsbeispiel gesucht, in dem die volle Funktionsfähigkeit des Systems demonstriert werden kann. Dabei entstand ein **virtuelles Labor**, welches viele Interaktionsmöglichkeiten bietet und somit alle Facetten demonstrieren kann.

In der Anwendung soll die Präsenz erhöht werden, indem nicht auf einen realen Versuchsleiter zurückgegriffen werden muss. Hierdurch wird ein Bruch der Immersion vermieden, der immer dann entsteht, wenn der Versuchsteilnehmer mit dem in der realen Welt anwesenden Instrukteur kommuniziert (vgl. Transitionen in Abschnitt 2.1.2). Die Kommunikation mit dem virtuellen Versuchsleiter MAX ermöglicht auch eine standardisierte Interaktion mit dem System, wodurch einheitliche Bedingungen für alle Teilnehmer geschaffen werden. Aus diesem Grund wurde ebenfalls auf eine individuelle, durch den Besucher gesteuerte, Navigation verzichtet. In diesem Szenario steuert MAX eine schwebende Scheibe (auch **Hover-Disk** genannt) und der Besucher schwebt mit MAX durch die Räume. Hierdurch kann zusätzlich die Trainingsphase eingespart werden. Abbildung 7.4 zeigt MAX und die Hover-Disk in dem Beispielszenario.

Zur Interaktion mit den verschiedenen Stationen stehen Datenhandschuhe mit taktilem Feedback zur Verfügung. Der Besucher kann so durch Gesten mit dem System interagieren. Als Alternative kann auch die WiiRemote verwendet werden. Hierdurch kann die Trainingsphase noch kürzer gehalten werden, allerdings auf Kosten der natürlichen Interaktion.

#### 7.2.1. Exemplarischer Ablauf

In diesem Abschnitt wird ein exemplarischer Durchlauf des Beispielszenarios vorgestellt. Die einzelnen Stationen sind in Abbildung 7.5 dargestellt und werden im Folgenden durch ihre zugehörige Nummerierung referenziert. Das Szenario startet in einem Vorraum (1), in dem der Besucher von MAX begrüßt wird. Max stellt sich selbst kurz vor und erläutert den weiteren Ablauf. Er erklärt, dass die Navigation von ihm übernommen wird. Sobald der Besucher alles verstanden hat, kann er einen Knopf drücken und ein Rolltor öffnet sich. Die Tour durch das virtuelle Labor kann starten.

Zunächst erfolgt eine Fahrt durch einen Flur (2), damit sich der Besucher an die Navigation auf der Hover-Disk gewöhnen kann. Die Wände sind ähnlich gestaltet wie





Abbildung 7.4.: MAX begrüßt den Besucher auf seiner Hover-Disk. Mit der Scheibe kann man durch die virtuellen Räume schweben. Die Steuerung wird alleine von MAX übernommen.

der reale Flur der AG WBS. Nach der Fahrt durch den Flur folgt auf der linken Seite der nächste große Raum – das Labor wird betreten.

Max gibt an dieser Stelle ein paar Informationen zu den möglichen Stationen, und der Besucher kann an den jeweiligen Stellen entscheiden, ob er die Attraktion besuchen möchte, oder nicht. Zunächst steht ein Schreibtisch mit verschiedenen Gegenständen bereit (3). Diese dienen der musikalischen Untermalung und demonstrieren das **Sound-system**. Der Besucher kann selbst entscheiden, welche Musik er anschaltet, und auch die Lautstärke lässt sich in einem gewissen Intervall regeln.

Die nächste Station im virtuellen Rundgang ist das Dosenwerfen, in der die **physikalische Interaktion** illustriert wird. Der Besucher darf so lange den Ball werfen, bis die Dosen abgeräumt sind. Wahlweise kann er im Anschluss die Bowlingbahn (4) nutzen – eine weitere Demonstration der Physik mit taktilen Stimuli. Als letzte Demonstration der physikalischen Interaktion gibt es die Möglichkeit, mit Bauklötzen einen Turm zu bauen (5).

## 7. INTEGRATION EINES AUTONOMEN AGENTEN

---

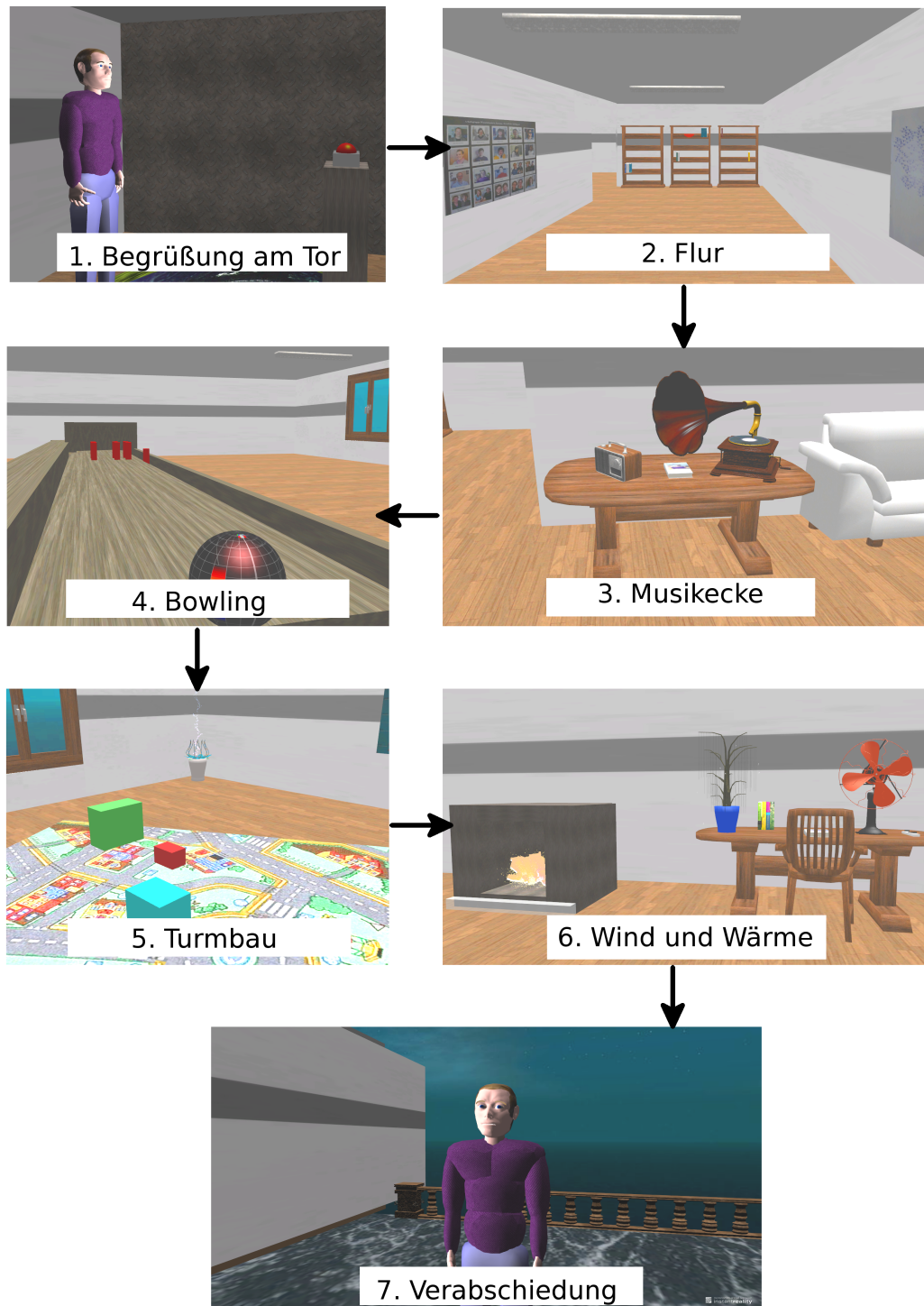


Abbildung 7.5.: Ablauf der virtuellen Laborführung. MAX bringt den Besucher zu verschiedenen Stationen (weitere Informationen im Text).

Anschließend können die thermischen Ausgaben in der Kaminecke (6) gespürt werden. Das **Wärmesystem** wird demonstriert, indem eine Klappe vor dem Kamin herauf- und heruntergefahren werden kann. Daran gekoppelt werden die Infrarotlampen an- und ausgeschaltet. Zusätzlich steht auf dem Tisch ein Ventilator bereit, der die Auswirkung einer statischen Windquelle (vgl. Abschnitt 4.5.2) aufzeigt. In Abhängigkeit von der eingestellten Stärke und der Position des Besuchers wird das **Windsystem** gesteuert. Max weist darauf hin, dass nun alle Stationen der Tour besichtigt wurden und die zur Verfügung stehende Zeit fast aufgebraucht ist.

Zum Abschluss möchte er dem Besucher aber einmal seinen persönlichen Lieblingsplatz zeigen – den Balkon. Dazu fahren beide auf der Hover-Disk durch den Ausgang und der Besucher kann die Sonne (Wärme) und eine leichte Brise (Wind) spüren als Beispiele für ambiente Sound-, Wind- und Wärmequellen (vgl. Kapitel 4). Für einen Augenblick kann man die Aussicht genießen, bevor Max sich verabschiedet (7).

## 7.3. Diskussion

Die Integration eines virtuellen Agenten bietet zum einen den Vorteil, dass die Welt belebt und somit realistischer wirkt. Zum anderen kann der virtuelle Agent gemeinsam mit dem Besucher Aktionen ausführen und ihm die Trainingsanweisungen geben. Wenn ein realer Versuchsleiter eingesetzt wird, erzeugt die “Stimme aus dem Off”, immer einen Bruch in der Präsenz. Deswegen wird in vielen Versuchen ein Tonband mit den Instruktionen abgespielt, da es so seltener zu einer versuchten Kontaktaufnahme mit dem Menschen in der Realität kommt.

Insbesondere erfüllt das illustrierte Beispielszenario aber das Autonomiekriterium nach Zeltzer. Es bleibt zu überprüfen, ob sich die Integration eines solchen virtuellen Agenten tatsächlich positiv auf die Präsenz der Besucher auswirkt, wie von Zeltzer angenommen. Im Folgenden wird dazu ein möglicher Versuchsaufbau skizziert, der in zukünftigen Projekten durchgeführt werden sollte.

### 7.3.1. Vorschlag zur Evaluation

Das vorgestellte virtuelle Labor eignet sich sehr gut, um die Auswirkung eines virtuellen Agenten auf die Präsenz des Besuchers zu evaluieren. Das Szenario ist reichhaltig genug,

## 7. INTEGRATION EINES AUTONOMEN AGENTEN

---

um dazu zu motivieren, in die Welt einzutauchen. Außerdem lässt sich Max leicht durch einen realen Versuchsleiter austauschen, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Um aussagekräftige Resultate erzielen zu können, wird eine Umsetzung mit vier Konditionen vorgeschlagen:

1. **Versuchsleiter MAX:** Wie in dem oben beschriebenen Szenario begleitet Max die Teilnehmer durch das Labor.
2. **Versuchsleiter Mensch:** Auf der Hover-Disk nimmt er eins zu eins die Position von MAX ein, taucht also selber in die virtuelle Welt ein. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Dialoge angepasst an das Beispielszenario auch von dem Versuchsleiter durchgeführt werden sollten. Zudem sollte ein Mann gewählt werden, um geschlechtsabhängige Störfaktoren zu vermeiden.
3. **Abstrakter Versuchsleiter (sichtbar):** Um die Auswirkung von autonomem Verhalten zu testen, sollte eine abstrakte (nicht antropomorphe) Repräsentation ebenfalls eingefügt werden. Dabei könnte beispielsweise ein virtueller Kasten (Lautsprecher o.ä.) zu sehen sein, aus dem ein Tonband die Informationen und Hinweise gibt. Der Unterschied zu Kondition 1 würde in der "Verkörperung" liegen.
4. **Abstrakter Versuchsleiter (nicht sichtbar):** In dieser Kondition ist der Versuchsleiter nicht sichtbar, es wird nur eine akustische Ausgabe abgespielt. Diese stimmt mit der von Kondition 1 und 3 überein. Diese Kondition entspricht dem heutigen Stand in den meisten virtuellen Studien, wenn ein Tonband abgespielt wird.

Als mögliche Störvariable muss dabei noch die Stimme beachtet werden. Am besten wird in allen Konditionen mit der gleichen Stimme gesprochen, dies ist aber bei Kondition 2 schwierig zu realisieren. Es wird vorgeschlagen, dies zunächst zu ignorieren und in einem späteren Experiment getrennt zu evaluieren. Es sollte eine Teilnehmerzahl von 15-20 Personen pro Kondition angestrebt werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Für die empirischen Untersuchungen werden die bereits in der durchgeführten Studie (siehe Kapitel 6) verwendeten Fragebögen vorgeschlagen, erweitert um standardisierte Fragebögen zu virtuellen Agenten. Da die Laborführung keine stressreichen Momente beinhaltet, kann außerdem auf die Verwendung von objektiven Messverfahren mittels Biosensoren verzichtet werden.

### 7.3.2. Wissensbasierte Integration

In Abschnitt 5.5 wurde bereits vorgeschlagen, das wissensbasierte Softwareframework für weitere Anwendungsfelder zu nutzen. Dafür hat [Fischer, 2011] im Rahmen seiner Bachelorarbeit eine erste prototypische Implementierung vorgenommen. Das Beispielszenario zeigt, dass es so leicht möglich ist, das “Wissen” der virtuellen Objekte den autonomen Agenten zur Verfügung zu stellen. Es wurde ein Versteckspiel mit einem virtuellen Agenten entwickelt, bei dem mehrere Aspekte berücksichtigt werden mussten: Der virtuelle Agent sollte über eine sichere Navigation innerhalb variierender virtueller Welten verfügen und zusätzlich die Objekte in der virtuellen Welt für sein Versteckspiel nutzen.

Um eine zuverlässige und schnelle Navigation in dynamischen Welten zu ermöglichen, wurde ein **Planungsalgorithmus** basierend auf virtuellen Potentialfeldern eingesetzt. Hindernisse werden in dieser Anwendung als Maxima (Potentialberge) und das Ziel wird als Minimum (Potentialtal) im Potentialfeld modelliert. Der negative Gradient des Feldes an der Position des Agenten wird ausgerechnet und mit der aktuellen Bewegungsrichtung des Agenten verrechnet. Durch den wissensbasierten Ansatz ist es möglich, dass Objekte anhand ihres Typs für unterschiedlich stark ausgeprägte Berge und Täler sorgen.

Damit ein Agent glaubhaft in einer virtuellen Welt situiert werden kann, sollte er die virtuellen Objekte wahrnehmen können. Es müssen Methoden und Wissen darüber, wie man mit vorhandenen Objekten interagieren kann, zur Verfügung stehen. Dazu wurden im Rahmen der Bachelorarbeit alle Knoten der Szene, welche vom Agenten wahrgenommen werden sollen, mit zusätzlichen Daten über dessen Eigenschaften angereichert. Für jedes Objekt wurde eine **Plandatei** erzeugt, in der festgehalten wird, welche Handlungen mit dem Objekt ausgeführt werden können. Der Vorteil dabei ist, dass nicht wie sonst üblich jeder Agent eine aufwendig erstellte Plandatei benötigt, sondern diese automatisch generiert wird. Mithilfe des wissensbasierten Konzeptes konnte diese Arbeit verringert werden, indem die Möglichkeit der semantischen Anreicherung ausgeschöpft wurde. Eine Sammlung von Plänen wird semantisch annotiert vorgehalten und durch die Annotation in den Metadaten (siehe Abschnitt 5.3) der Objekte kann ein Agent passende Pläne laden.

Abbildung 7.6 zeigt eine Szene aus dem entwickelten System. Als Beispielszenario dient dabei die ebenfalls in der AG WBS entwickelte Biosphere. Die abgebildeten (a) Bäume und Büsche werden bei jedem Start neu und zufällig platziert. In der Welt ist

## 7. INTEGRATION EINES AUTONOMEN AGENTEN

---

darüber hinaus ein sogenannter **Kindergeist** (bei (b)) situiert, der folgende Ziele und Pläne verfolgt: Die meiste Zeit geht er seinen beiden Grundbedürfnissen nach: Spielen (z.B. mit einem (b) Ball), um sich die Langeweile zu vertreiben, und Schlafen, falls er müde geworden ist. Kommt jedoch ein (c) menschlicher Besucher in die Szene, versucht er, sich dem Menschen zu nähern. Allerdings möchte er nicht zu nah heran kommen und versteckt sich, wenn der Besucher versucht, ihn zu fangen.

Die Informationen zu seinen Grundbedürfnissen und persönliche Werte, wie z.B. Zutraulichkeit, werden bei dem Agenten selbst gespeichert. Somit können unterschiedliche Individuen mit eigenen “**Persönlichkeiten**” erschaffen werden. Die Informationen zu den Objekten erhalten alle Agenten aus der Wissensbasis. Dazu zählt zum Beispiel die Information, dass man sich hinter einem Baum verstecken kann oder den Ball zum Spielen nutzen kann.

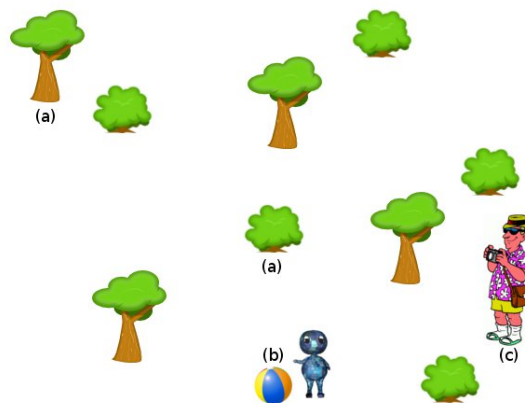


Abbildung 7.6.: Beispielszenario zur Demonstration der wissensbasierten Integration eines virtuellen Agenten nach [Fischer, 2011].

### 7.4. Zusammenfassung

Die beschriebenen Inhalte gehen über die in Abschnitt 1.2 gesetzten Ziele hinaus. Ursprünglich sollte die Präsenz des Besuchers einer virtuellen Welt, durch den Einsatz multisensorischer Stimuli erhöht werden. Der Effekt, den dieser Einsatz auf die Präsenz hat, sollte anhand einer empirischen Studie untersucht werden. Zur Integration der multisensorischen Stimuli sollte außerdem ein Framework geschaffen werden, das den dafür benötigten Arbeitsaufwand möglichst gering hält.

Die geleisteten Arbeiten in diesem Abschnitt verfolgen das zusätzliche Ziel, noch näher an eine nach [Zeltzer, 1992] definierte VR zu gelangen. Dies geschieht durch den Einsatz intelligenter virtueller Agenten, die den Anteil der **Autonomie** einer virtuellen Welt erhöhen sollen. Wie in Abbildung 7.7 veranschaulicht, kann somit ein Schritt in der dritten Dimension (Autonomie) geleistet werden. Es ist anzumerken, dass, obwohl hier ein weit entwickelter, humanoider Agent gewählt wurde, auch die Integration einfacher autonomer Lebewesen (Tiere, Roboter, ...) dem Autonomie-Kriterium nach Zeltzer gerecht werden können.

Das vorgeschlagene Szenario aus Abschnitt 7.2 wurde bereits implementiert und ein exemplarischer Ablauf beschrieben. Zusätzlich wurde in Abschnitt 7.3.1 eine zweite Benutzerstudie konzipiert, die den Effekt eines solchen virtuellen Agenten auf die Präsenz des Besuchers untersuchen soll. Abschließend wurde die Integration intelligenter virtueller Agenten mit Hilfe des vorgestellten wissensbasierten Frameworks anhand eines Beispiels gezeigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Integration autonomer Agenten die gesamte Autonomie einer virtuellen Umgebung gesteigert werden kann. Hierdurch wird ein weiterer Schritt in Richtung einer echten **Virtuellen Realität** gemacht, der über die

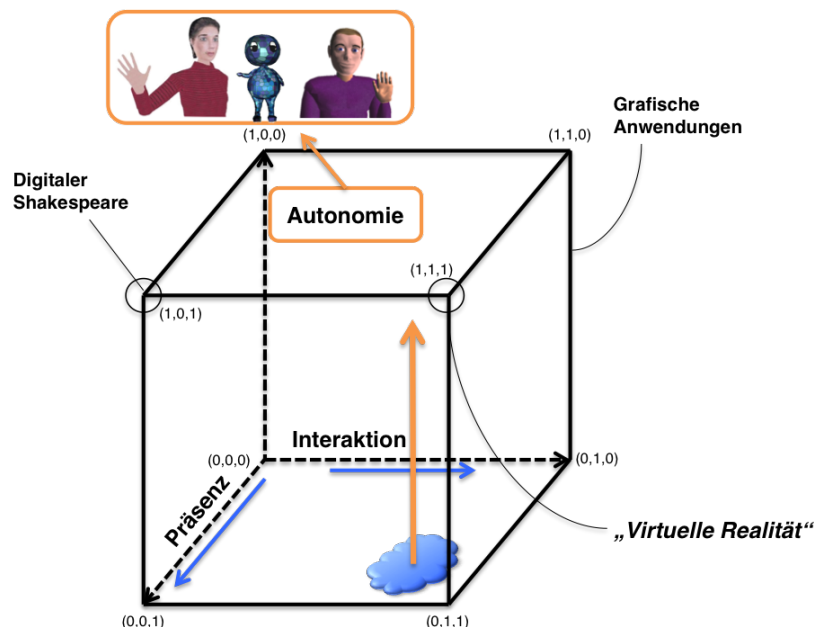


Abbildung 7.7.: Illustration der Integration virtueller Agenten, ausgehend von dem bereits entwickelten System, nach [Zeltzer, 1992].

## 7. INTEGRATION EINES AUTONOMEN AGENTEN

---

ursprünglich gesetzten Ziele hinaus geht. Der Effekt auf die **Präsenz** des Besuchers muss dabei in zukünftigen Arbeiten noch bestimmt werden. Durch die Transferleistung der Integration virtueller Agenten in das wissensbasierte Framework werden weitere Möglichkeiten für die Zukunft eröffnet, diese Anbindung mit minimiertem Arbeitsaufwand leisten zu können.



## RESÜMEE

In der vorliegenden Dissertation wurde ein System entwickelt und evaluiert, das die Generierung multisensorischer Stimuli ermöglicht. Es wurde darauf geachtet, dass der Entwicklungsaufwand zur Integration der Stimuli möglichst gering bleibt, und zu diesem Zweck ein wissensbasiertes Konzept vorgestellt. Abschließend werden nun die geleisteten Arbeiten rekapituliert und in einen Gesamtkontext eingeordnet. Als erstes erfolgt dafür ein Abgleich der gesetzten Ziele und ihrer Anforderungen mit den entwickelten Lösungen. Dies geschieht zunächst getrennt für die einzelnen Teilziele. In einem Fazit bringt eine Gesamtbetrachtung die Teilerfolge zusammen, und der geleistete Beitrag zum Stand der Forschung wird erörtert. Zum Abschluss werden mögliche weiterführende Arbeiten besprochen.

### 8.1. Ergebnisse

Um den Gesamtbeitrag auszuarbeiten, werden zunächst die eingangs formulierten drei Fragen an Hand der Ergebnisse der Arbeit beantwortet.

**Frage 1** Wie können **multisensorische Stimuli** in virtuelle Welten integriert werden?

→ **Teilziel 1** Um die unterschiedlichen Sinne des Menschen anzusprechen, sollen entsprechende Ausgabemöglichkeiten technisch integriert werden.

Kapitel 4 konzipiert, aufbauend auf den Grundlagen und verwandten Arbeiten in Kapitel 2 und 3, die **technische Integration** eines Soundsystems, eines physikbasierten Systems mit taktilem Ausgabe, eines Windsystems und eines Wärmesystems sowie deren multisensorische Integration. Neben den bereits formulierten Anforderungen wurden wichtige Sicherheitsaspekte sowie die Kosteneffizienz der Hardwareerweiterungen berücksichtigt. Die Berechnung der einzelnen und kombinierten multisensorischen Stimuli erfolgt in Echtzeit und wurde mit den vorhandenen Rechenressourcen realisiert. Zu Gunsten dieser **Effizienz** wurde auf eine physikalisch vollständig korrekte Umsetzung verzichtet. Dennoch sind die entwickelten und ausgewählten Berechnungsverfahren nicht als unnatürlich zu bezeichnen. Es wurden Simulationen gewählt, die für einen möglichst realistischen Eindruck sorgen und somit ein hohes Maß an **Natürlichkeit** approximieren. Die Ausgaben decken ein umfangreiches Spektrum an real auftretenden Phänomenen ab. Um wirklich jedes reale Phänomen darstellen zu können, bedarf es neben einer physikalischen Simulation auch einer sehr exakten Modellierung der Materialeigenschaften. Durch die entwickelte Dreiteilung in ambiente, statische und ereignisbasierte Quellen ist es möglich, eine große Menge an multisensorischen Stimuli zu generieren, um der Anforderung der **Vollständigkeit** in zufriedenstellendem Maße gerecht zu werden.

**Frage 2** Wie kann der benötigte **Arbeitsaufwand** bei der Entwicklung multimodaler virtueller Welten gering gehalten werden?

→ **Teilziel 2** Es soll ein Softwareframework entwickelt werden, das die Generierung multisensorischer Stimuli mit möglichst wenig Arbeitsaufwand ermöglicht.

Nachdem das entwickelte System (Kapitel 4) vorgestellt und mit den Anforderungen abgeglichen wurde, erfolgte in Kapitel 5 eine einleitende Betrachtung des damit zusammenhängenden Arbeitsaufwands. Da dieser als sehr hoch einzustufen war, wurde ein Softwareframework konzipiert, mit dem der Arbeitsaufwand minimiert werden konnte. Der Einsatz wissenschaftlicher Methoden zur Anreicherung virtueller Objekte erlaubt es, multisensorische Stimuli sowohl in bereits vorhandene wie auch neu entwickelte virtuelle Welten mit geringem Arbeitsaufwand zu integrieren. Bezüglich der aufgestellten Anforderungen konnte ein hohes Maß an **Modularität** geschaffen werden. Die Komponenten wurden hardwareunabhängig entwickelt, um eine **Portabilität** zu erreichen. Lediglich das Einlesen und Generieren muss auf die jeweilige Arbeitsumgebung angepasst wer-

den (vgl. Abschnitt 5.2). Es ist somit zu erwarten, dass die Übertragung in eine andere Umgebung unkompliziert ist, entsprechende Versuche stehen allerdings noch aus. Im möglichen Rahmen wurden die drei Kriterien der **Gebrauchstauglichkeit** (Effektivität, Effizienz, Zufriedenheit) nach ISO 9241 berücksichtigt. Es war nicht möglich, im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine entsprechende Usability-Studie durchzuführen.

**Frage 3** Wie kann **evaluiert** werden, wie sich multisensorische Stimuli auf die Präsenz auswirken?

→ **Teilziel 3** Es soll empirisch untersucht werden, wie sich die multisensorischen Stimuli auf die Präsenz der Besucher auswirken.

Es wurde eine Benutzerstudie mit insgesamt 80 Versuchsteilnehmern durchgeführt, die in vier Gruppen eingeteilt wurden. Jeder Gruppe wurde eine unterschiedliche Kombination der generierten multisensorischen Stimuli präsentiert. Die Messungen wurden in einem Szenario mit virtuellem Abgrund durchgeführt, das aus ähnlichen Studien bekannt ist und den Einsatz objektiver Messverfahren erlaubt. Zur Datenerfassung wurden sowohl subjektive Verfahren (Fragebögen) wie auch objektive Verfahren (Hautleitfähigkeit, Herzrate) eingesetzt. Die Auswahl der Messverfahren sowie des Versuchsaufbaus wurden basierend auf den drei **Gütekriterien** für psychologische Tests getroffen. Dabei können Objektivität und Reliabilität angenommen werden. Die Validität wurde intern (durch Mitarbeiter der Arbeitsgruppe) abgeschätzt und fällt aufgrund der **Vergleichbarkeit** des Versuchsaufbaus ebenfalls positiv aus. Da aber in den meisten ähnlichen Studien mit einem HMD und lokalen Geräten getestet wurde, kann die Frage der Vergleichbarkeit in diesem Punkt nicht vollständig beantwortet werden. Eine vergleichende Evaluation zwischen CAVE und HMD zeigte mit dem verwendeten Aufbau keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung. Die Integration in die Hauptstudie hätte zu einer doppelten Anzahl der Versuchspersonen geführt und wäre somit nicht praktikabel gewesen.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine größere Anzahl Modalitäten nicht automatisch zu einer erhöhten Präsenz führt. Erst als alle generierten multisensorischen Stimuli gleichzeitig eingesetzt wurden, konnte eine signifikante Erhöhung der Präsenz gemessen werden. Die Interpretation der Daten mit einem “uncanny valley” eröffnet weitere interessante Fragen für zukünftige Studien, sodass an dieser Stelle von einer **Nützlichkeit** für

zukünftige Projekte ausgegangen werden kann.

### 8.2. Fazit

In Bezug auf die einzelnen Teilziele konnten zufriedenstellende Lösungen gefunden werden (s.o.). Wie aber sieht es mit dem übergeordneten Gesamtziel aus? Dies wurde einleitend formuliert als:

Es soll ein System zur Generierung multisensorischer Stimuli entwickelt werden, deren Auswirkungen auf die Besucher evaluiert werden. Der Arbeitsaufwand zur Erstellung dieser Ausgaben soll möglichst gering gehalten werden.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation ist es gelungen, im Bielefelder Labor für Künstliche Intelligenz und Virtuelle Realität (AI & VR Lab) ein System zur **Generierung multisensorischer Stimuli** bereit zu stellen. Die Systeme wurden einzeln wie auch kombiniert auf ihre technische Funktionalität überprüft. Das resultierende Gesamtsystem stellt eins der umfangreichsten multisensorischen Stimulationsmöglichkeiten bereit, die in heutigen (CAVE-basierten) VR-Laboren zu finden sind. Eine Nutzerstudie zeigte, dass die so generierten Stimuli zu einer erhöhten Präsenz führen, wenn sie gemeinsam eingesetzt werden. Die Erfahrung im Einsatz der Arbeitsgruppe Wissensbasierte Systeme zeigt, dass die Integration zum einen lohnenswert und zum anderen der benötigte Arbeitsaufwand nicht zu hoch ist. Die vorgestellten Arbeiten haben somit versucht, einen möglichst umfassenden Beitrag zum Stand der Forschung zu leisten.

Mit Bezug auf den definierten **Zeltzer-Würfel** (vgl. Abschnitt 2.1.1) wurde in Kapitel 7 die zusätzlich erfolgte Integration eines autonomen Agenten innerhalb eines Beispielszenarios beschrieben. Die Anwesenheit eines solchen virtuellen Menschen kann nicht als zusätzliche multisensorische Stimulation betrachtet werden, stellt nach Zeltzer jedoch eine ganz eigene Dimension für virtuelle Welten dar. Hierfür konnte nur ein exemplarischer Ansatz umgesetzt werden, sodass ausgehend von der prototypischen Integration eine Generalisierungsmöglichkeit betrachtet wird. Abschließend können die Beiträge der vorliegenden Dissertation wie in Abbildung 8.1 skizziert, zusammengefasst werden. Mittels der neuen Ausgabemöglichkeiten konnte insbesondere ein großer Fortschritt auf der Präsenz-Achse erzielt werden. Die Integration einer Physik-Engine in Verbindung

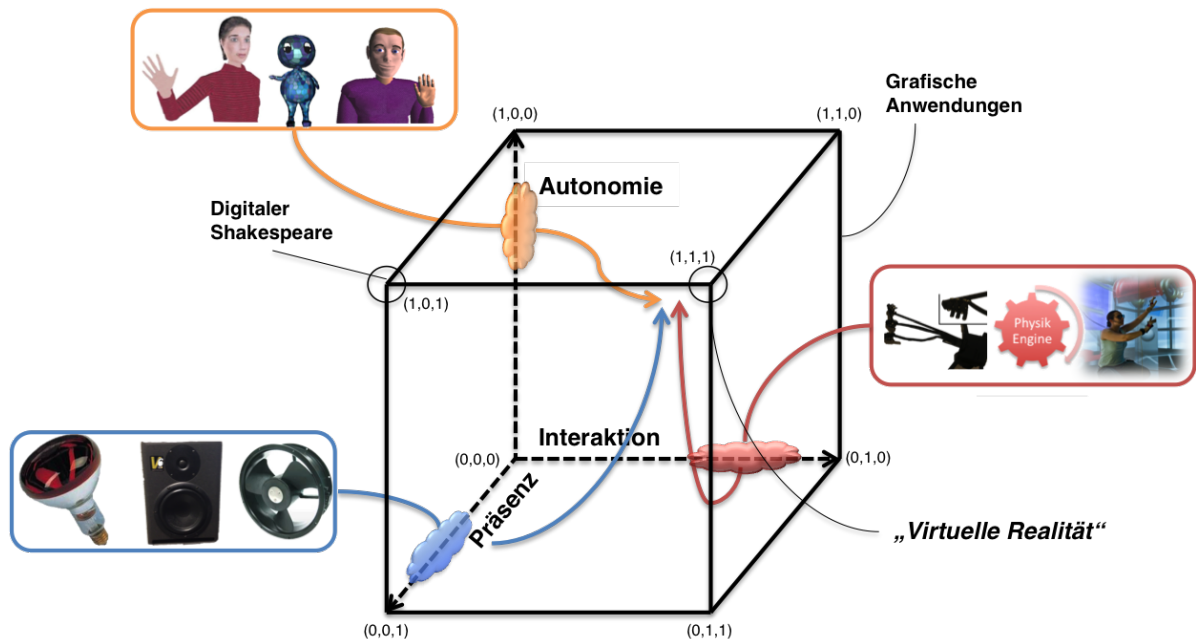


Abbildung 8.1.: Zusammenfassende Illustration der geleisteten Arbeiten anhand des AIP-Würfels. Zusätzlich steht ein wissensbasiertes Softwareframework bereit, das die Integration der einzelnen Komponenten mit minimalem Arbeitsaufwand erlaubt.

mit den schon vorhandenen Verfahren der AG WBS, führten zu einer Verbesserung auf der Interaktionsachse. Durch die Einbeziehung von MAX als **autonomen virtuellen Agenten** konnte somit im Gesamten ein guter Schritt in Richtung ultimativer VR (Punkt  $(1,1,1)$ ) unternommen werden. Das entwickelte Softwareframework erlaubt es zudem diese Fortschritte mit geringem Arbeitsaufwand in virtuelle Welten zu integrieren.

## 8.3. Ausblick

Die Generierung multisensorischer Stimuli führt zu einer erhöhten Präsenz der Besucher in der virtuellen Realität. Aus den Ergebnissen der Nutzerstudie lässt sich ableiten, dass dazu so viele Sinne wie möglich angesprochen werden sollten. Die Installation des Wärmesystems (vgl. Abschnitt 4.5.3) ist dabei ein guter Anfang. In zukünftigen Installationen sollten jedoch noch weitere Sinneseindrücke berücksichtigt werden. Dabei sind insbesondere Gerüche über olfaktorische Displays, wie sie in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt wurden, wünschenswert, aber es sollten auch die Möglichkeiten weiterer Ausgabemoda-

litäten evaluiert werden.

Die in Kapitel 7 dargelegte prototypische Integration eines autonomen virtuellen Menschen ist nach Zeltzers Hypothese ein Kernfaktor für die ultimative virtuelle Realität (s.o.). Eine systematische Nutzerstudie sollte diese Hypothese testen und die Anforderungen und den Nutzen solcher Erweiterungen formalisieren. Eine Studie, wie sie in Abschnitt 7.3.1 konzipiert wurde, kann Aufschlüsse über die tatsächliche Bedeutung dieser Dimension liefern.

Das in Kapitel 5 vorgestellte **wissensbasierte Konzept** beruht maßgeblich auf der zugrunde liegenden Wissensbasis. Im Rahmen dieser Dissertation konnte eine Sammlung von multisensorischen Informationen (z.B. Klängen) begonnen werden. Die bisherigen Inhalte beziehen sich auf die in dem Arbeitskontext der AG WBS benötigten Ausgaben. Es ist wünschenswert, in Zukunft die Belange anderer Projekte und Themengebiete zu inkludieren, um eine umfassende Datenbank mit den Informationen zur multisensorischen Ausgabe aufzubauen. Dabei soll ein möglichst großes Spektrum an Informationen abgedeckt werden, um vielfältigen Einsatzgebieten gerecht zu werden. Zu den weiteren Anforderungen gehört es, dass diese Wissensbasis über eine gute semantische Annotation verfügen muss, um dem Entwickler die Möglichkeit zu geben, feine Abstufungen innerhalb seiner Anwendung multisensorisch zu verdeutlichen.

In der Retrospektive stellt das entwickelte System vor allem durch seine Vielfältigkeit an multisensorischen Stimuli Erweiterungen bereit, die in ihrer Kombination die Präsenz des menschlichen Besuchers erhöhen. Dies eröffnet reichhaltige Möglichkeiten für zukünftige Erweiterungen, um eines Tages die Vision einer ultimativen Virtuellen Realität Wirklichkeit werden zu lassen.

# Literaturverzeichnis

- [Bartneck et al., 2007] Bartneck, C., Kanda, T., Ishiguro, H., und Hagita, N. (2007). Is The Uncanny Valley An Uncanny Cliff? In *Robot and Human interactive Communication, 2007. RO-MAN 2007. The 16th IEEE International Symposium on*, Seiten 368–373. IEEE.
- [Baur et al., 2013] Baur, T., Damian, I., Gebhard, P., Porayska-Pomsta, K., und André, E. (2013). A Job Interview Simulation: Social Cue-based Interaction with a Virtual Character. In *Proceedings of the IEEE/ASE International Conference on Social Computing (SocialCom 2013)*, Seiten 220–227. IEEE, Washington D.C., USA.
- [Becker-Asano, 2008] Becker-Asano, C. (2008). *WASABI: Affect Simulation for Agents with Believable Interactivity*. PhD thesis, Universität Bielefeld.
- [Begault, 1994] Begault, D. R. (1994). *3D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Academic Press.
- [Biermann et al., 2002] Biermann, P., Jung, B., Latoschik, M. E., und Wachsmuth, I. (2002). Virtuelle Werkstatt: A platform for multimodal assembly in VR. *Proceedings of the Fourth Virtual Reality International Conference (VRIC 2002)*, Seiten 53–62.
- [Blascovich und Bailenson, 2011] Blascovich, J. und Bailenson, J. (2011). *Infinite Reality: Avatars, Eternal Life, New Worlds, and the Dawn of the Virtual Revolution*. William Morrow & Co.
- [Bordens und Abbott, 2002] Bordens, K. S. und Abbott, B. B. (2002). *Research design and methods: A process approach*. McGraw-Hill.

- [Bormann, 2008] Bormann, K. (2008). Visuals are not what they look. *Virtual Reality*, 12(2):115–123.
- [Bratman, 1987] Bratman, M. E. (1987). *Intention, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- [Brenton et al., 2005] Brenton, H., Gillies, M., Ballin, D., und Chatting, D. (2005). The Uncanny Valley: does it exist? In *In: 19th British HCI Group Annual Conference: workshop on human-animated character interaction*.
- [Brockhaus, 1998] Brockhaus (1998). Brockhaus: Die Enzyklopädie (verschiedene Beiträge). Erscheinungszeitraum 1997-1999.
- [Brunnett et al., 2008] Brunnett, G., Coquillart, S., und Welch, G. (2008). 08231 Abstracts Collection – Virtual Realities. In Brunnett, G., Coquillart, S., und Welch, G., editors, *Virtual Realities*, number 08231 in Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Germany. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum fuer Informatik, Germany.
- [Burdea, 1996] Burdea, G. (1996). *Force and touch feedback for Virtual Reality*. Wiley New York.
- [Campbell, 2009] Campbell, N. A. (2009). *Biology / Neil A. Campbell ... [et al.]*. Pearson Education Australia Frenchs Forest, N.S.W, 6th (german version) edition.
- [Cardin et al., 2007] Cardin, S., Thalmann, D., und Vexo, F. (2007). Head Mounted Wind. In *Computer Animation and Social Agents*, Seiten 101–108.
- [Charniak, 1985] Charniak, E. (1985). *Introduction to Artificial Intelligence*. Pearson Education India.
- [Cohen, 1977] Cohen, D. C. (1977). Comparison of Self-Report and Overt-Behavioral Procedures for Assessing Acrophobia. *Behavior Therapy*, 8(1):17 – 23.
- [Cruz-Neira et al., 1992] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., und Hart, J. C. (1992). The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Commun. ACM*, 35(6):64–72.
- [Dankert, 2010] Dankert, T. P. (2010). *Implementierung eines event-basierten Spatial Sound Servers*. Bachelorarbeit, Universität Bielefeld.



- [De Luca et al., 2009] De Luca, A., Mattone, R., Giordano, P. R., und Bühlhoff, H. (2009). Control design and experimental evaluation of the 2D CyberWalk platform. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, Seiten 5051–5058. IEEE.
- [Deligiannidis und Jacob, 2006] Deligiannidis, L. und Jacob, R. J. K. (2006). The VR Scooter: Wind and Tactile Feedback Improve User Performance. In *3DUI'06*, Seiten 143–150.
- [Dinh et al., 1999] Dinh, H. Q., Walker, N., Song, C., Kobayashi, A., und Hodges, L. F. (1999). Evaluating the Importance of Multi-sensory Input on Memory and the Sense of Presence in Virtual Environments. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality, VR '99*, Seiten 222–228, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Dionisio, 1996] Dionisio, J. (1996). Temperature feedback in Virtual Environments. In *Imaging Sciences and Display Technologies*, Seiten 233–243.
- [Dionisio, 1997] Dionisio, J. (1997). Virtual Hell: A Trip Through the Flames. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 17(3):11–14.
- [DiZio und Lackner, 2002] DiZio, P. und Lackner, J. R. (2002). Proprioceptive Adaptation and Aftereffects. *Handbook of Virtual Environment Technology*.
- [Fellner et al., 2009] Fellner, D., Behr, J., und Bockholt, U. (2009). Instantreality - A Framework for Industrial Augmented and Virtual Reality Applications. In *The 2nd Sino-German Workshop Virtual Reality & Augmented Reality in Industry*.
- [Field, 2009] Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS*. Sage publications.
- [Fischer, 2011] Fischer, K. (2011). *Versteckspiel in der Biosphere – Glaubwürdige Agenten in interaktiven virtuellen Welten*. Bachelorarbeit, Universität Bielefeld.
- [fmod, 2010] fmod (2010). fmod - interactive audio middleware. <http://www.fmod.org>. Last visited 02/05/14.
- [Fröhlich und Wachsmuth, 2011a] Fröhlich, J. und Wachsmuth, I. (2011a). A phong-based concept for 3D-audio generation. In *Smart Graphics*, Seiten 184–187. Springer.

- [Fröhlich und Wachsmuth, 2011b] Fröhlich, J. und Wachsmuth, I. (2011b). Ein wissensbasiertes Konzept für die 3D Klanggenerierung in virtuellen Welten. Number 295 in 10. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Seiten 133–143. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn.
- [Fröhlich und Wachsmuth, 2012] Fröhlich, J. und Wachsmuth, I. (2012). Acoustically enriched virtual worlds with minimum effort. In *Proceedings of the 2012 IEEE Virtual Reality, VR '12*, Seiten 147–148, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Fröhlich und Wachsmuth, 2013a] Fröhlich, J. und Wachsmuth, I. (2013a). Frischer Wind in der CAVE: Realisierung und Evaluation einer multimodalen virtuellen Welt. Volume 311 of *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, HNI-Verlagsschriftenreihe (Bd. 311)*, Seiten 191–203. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, HNI Verlagsschriftenreihe Band 311.
- [Fröhlich und Wachsmuth, 2013b] Fröhlich, J. und Wachsmuth, I. (2013b). The Visual, the Auditory and the Haptic – A User Study on Combining Modalities in Virtual Worlds. In *Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments*, Seiten 159–168. Springer.
- [Fröhlich und Wachsmuth, 2014] Fröhlich, J. und Wachsmuth, I. (2014). *Combining multi-sensory stimuli in virtual worlds - a progress report*, Volume 8525 of *Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments*, Seiten 44–54. Springer International Publishing Switzerland.
- [Funkhouser et al., 2003] Funkhouser, T., Tsingos, N., und Jot, J.-M. (2003). Survey of Methods for Modeling Sound Propagation in Interactive Virtual Environment Systems. *Presence and Teleoperation*.
- [Gausemeier et al., 2001] Gausemeier, J., Ebbesmeyer, P., und Kallmeyer, F. (2001). *Produktinnovation: strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. Hanser Verlag.
- [Grady, 1992] Grady, R. B. (1992). *Practical Software Metrics for Project Management and Process Improvement*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- [Grady und Caswell, 1987] Grady, R. B. und Caswell, D. L. (1987). *Software Metrics: Establishing a Company-wide Program*.

- [Hammerl et al., 2007] Hammerl, S., Preuss, T., und Latoschik, M. E. (2007). WiiNC - Wii Network Control - Einsatz des Wii-Controllers für VR-Anwendungen. *Virtuelle und Erweiterte Realität*, 4. Workshop of the GI VR & AR special interest group, Seiten 141–148.
- [Hassenzahl, 2003] Hassenzahl, M. (2003). Attraktive Software - Was Gestalter von Computerspielen lernen können. *User Interface Tuning. Benutzungsschnittstellen menschlich gestalten*, 2:5–7.
- [Heilig, 2013] Heilig, M. (2013). Webseite von Morton Heilig. <http://www.mortonheilig.com/InventorVR.html>. Zuletzt besucht am 06.01.2014.
- [Heilig, 1962] Heilig, M. L. (1962). Sensorama simulator, U.S.patent no.3050870.
- [Held und Durlach, 1991] Held, R. und Durlach, N. (1991). Telepresence, time delay and adaptation. *Pictorial communication in virtual and real environments*, Seiten 232–246.
- [Hiebert, 2005] Hiebert, G. (2005). OpenAL 1.1 specification and reference.
- [Hilsendeger et al., 2009] Hilsendeger, A., Brandauer, S., Tolksdorf, J., und Fröhlich, C. (2009). Navigation in Virtual Reality with the Wii Balance Board. In *6th Workshop on Virtual and Augmented Reality*.
- [Hirota et al., 2013] Hirota, K., Ito, Y., Amemiya, T., und Ikei, Y. (2013). Presentation of Odor in Multi-Sensory Theater. In *HCI (19)*, Seiten 372–379.
- [Hülsmann, 2013] Hülsmann, F. (2013). *Wind und Wärme in Virtueller Realität*. Masterarbeit, Universität Bielefeld.
- [Hülsmann et al., 2014] Hülsmann, F., Fröhlich, J., Mattar, N., und Wachsmuth, I. (2014). Wind and warmth in virtual reality: implementation and evaluation. VRIC '14: Proceedings of the Virtual Reality International Conference: Laval Virtual. ACM.
- [Hülsmann et al., 2013] Hülsmann, F., Mattar, N., Fröhlich, J., und Wachsmuth, I. (2013). Wind and Warmth in Virtual Reality – Requirements and Chances. In *Virtuelle und Erweiterte Realität: 10. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR*, Seiten 133–144.

- [Husung, 2012] Husung, S. (2012). *Simulation akustischer Produkteigenschaften unter Nutzung der Virtual Reality während der Produktentwicklung*. PhD thesis, Technische Universität Ilmenau.
- [Ijsselsteijn et al., 1998] Ijsselsteijn, W., de Ridder, H., Hamberg, R., Bouwhuis, D., und Freeman, J. (1998). Perceived depth and the feeling of presence in 3DTV. *Displays*, 18(4):207 – 214.
- [ISO/IEC, 1996] ISO/IEC (1996). Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen maschinenbestückter Arbeitsstätten - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11690-1:1996); Deutsche Fassung EN ISO 11690-1:1996.
- [ISO/IEC, 1998] ISO/IEC (1998). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 10: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit – Leitsätze (ISO 9241-11:1998); Deutsche Fassung EN ISO 9241-11:1998.
- [ISO/IEC, 2001] ISO/IEC (2001). ISO/IEC 9126. Software engineering – Product quality.
- [ISPR, 2010] ISPR (2010). The Concept of Presence: Explication Statement. <http://ispr.info/>. Zuletzt besucht am 06.03.2014.
- [ISPR, 2013] ISPR (2013). Webseite der International Society for Presence Research (ISPR). <http://ispr.info/>. Zuletzt besucht am 06.03.2014.
- [Jung und Kopp, 2003] Jung, B. und Kopp, S. (2003). FlurMax: An Interactive Virtual Agent for Entertaining Visitors in a Hallway. In *Intelligent virtual agents*, Seiten 23–26. Springer.
- [Jung et al., 2000] Jung, B., Kopp, S., Latoschik, M. E., Sowa, T., und Wachsmuth, I. (2000). Virtuelles konstruieren mit gestik und sprache. *KI - Künstliche Intelligenz 2/2000*, Seiten 5–11.
- [Jung et al., 2002] Jung, B., Latoschik, M., Biermann, P., und Wachsmuth, I. (2002). Virtuelle Werkstatt. In *1. Paderborner Workshop Augmented Reality / Virtual Reality in der Produktentstehung*, Seiten 185–196, Paderborn. HNI.

- [Jung et al., 1995] Jung, B., Lenzmann, B., und Wachsmuth, I. (1995). Interaktive Montage-Simulation mit wissensbasierter Grafik. Proceedings des 8. Workshop Simulation und Künstliche Intelligenz: Virtuelle Realität in der Simulation., Darmstadt.
- [Jung und Wachsmuth, 1995] Jung, B. und Wachsmuth, I. (1995). Situierte Instruktionsverarbeitung im CODY Virtuellen Konstrukteur. KI-95 Activities: Workshops, Posters, Demos, Seiten 332–334. Gesellschaft für Informatik e.V.
- [Jung et al., 2009] Jung, Y., Weber, C., Keil, J., und Franke, T. (2009). Real-time rendering of skin changes caused by emotions. In *Intelligent Virtual Agents*, Seiten 504–505. Springer.
- [Kennedy et al., 1993] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., und Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220.
- [Kopp, 2003] Kopp, S. (2003). *Synthese und Koordination von Sprache und Gestik für virtuelle multimodale Agenten*. PhD thesis, Universität Bielefeld.
- [Kopp et al., 2005] Kopp, S., Gesellensetter, L., Krämer, N. C., und Wachsmuth, I. (2005). A Conversational Agent as Museum Guide—Design and Evaluation of a Real-World Application. In *Intelligent Virtual Agents*, Seiten 329–343. Springer.
- [Kopp et al., 2003] Kopp, S., Jung, B., Lessmann, N., und Wachsmuth, I. (2003). Max - a multimodal assistant in virtual reality construction. *KI*, 17(4):11.
- [Kramer et al., 2013] Kramer, M., Yaghoubzadeh, R., Kopp, S., und Pitsch, K. (2013). A conversational virtual human as autonomous assistant for elderly and cognitively impaired users? Social acceptability and design considerations. Volume P-220 of *Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Seiten 1105–1119. Köllen Druck + Verlag GmbH.
- [Krueger, 1991] Krueger, M. (1991). *Artificial Reality II*. Addison-Wesley.
- [Lanier, 1992] Lanier, J. (1992). Virtual Reality: The Promise of the Future. *Interactive Learning International*, 8(4):275–279.

- [Larsson et al., 2001] Larsson, P., Västfjäll, D., und Kleiner, M. (2001). Ecological Acoustics and the Multi-Modal Perception of Rooms: Real and Unreal Experiences of Auditory-Visual Virtual Environments. In *Proc. of the Conf. on Auditory Display*, Seiten 245–249.
- [Latoschik, 2001] Latoschik, M. E. (2001). *Multimodale Interaktion in Virtueller Realität am Beispiel der virtuellen Konstruktion*. PhD thesis, Universität Bielefeld.
- [Latoschik, 2002] Latoschik, M. E. (2002). Designing Transition Networks for Multimodal VR-Interactions Using a Markup Language. In *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Multimodal Interfaces*, Seite 411. IEEE Computer Society.
- [Latoschik et al., 2005] Latoschik, M. E., Biermann, P., und Wachsmuth, I. (2005). Knowledge in the Loop: Semantics Representation for Multimodal Simulative Environments. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Smart Graphics 2005*, Seiten 25–39.
- [Latoschik und Tramberend, 2010] Latoschik, M. E. und Tramberend, H. (2010). Guru Meditation: Kopplung & Kohäsion - Entwicklung interaktiver Graphiksysteme. In Jürgen Gausemeier, M. G., editor, *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*, Seiten 299–315. Heinz Nixdorf MuseumsForum.
- [Latoschik und Tramberend, 2011] Latoschik, M. E. und Tramberend, H. (2011). Simulator X: A Scalable and Concurrent Architecture for Intelligent Realtime Interactive Systems. In *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, Seiten 171–174. IEEE.
- [Latypov, 2006] Latypov, N. (2006). The Virtosphere. URL: <http://www.virtosphere.com>.
- [Lehmann et al., 2009] Lehmann, A., Geiger, C., Wöldecke, B., und J., S. (2009). Poster: Design and Evaluation of 3D Content with Wind Output. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, Seiten 152–152.
- [Lem, 1976] Lem, S. (1976). *Summa technologiae*. Insel Verlag.

- [Lentz et al., 2006] Lentz, T., Assenmacher, I., Vorländer, M., und Kuhlen, T. (2006). Precise near-to-head acoustics with binaural synthesis. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 3(2):1860–2037.
- [Lentz et al., 2007] Lentz, T., Schröder, D., Vorländer, M., und Assenmacher, I. (2007). Virtual reality system with integrated sound field simulation and reproduction. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2007(1):187–187.
- [Lienert und Raatz, 1998] Lienert, G. A. und Raatz, U. (1998). *Testaufbau und Testanalyse*. Beltz.
- [Loyall, 1997] Loyall, A. B. (1997). *Believable Agents: Building Interactive Personalities*. PhD thesis, Stanford University.
- [Luck und Aylett, 2000] Luck, M. und Aylett, R. (2000). Applying Artificial Intelligence to Virtual Reality: Intelligent Virtual Environments. *Applied Artificial Intelligence*, 14(1):3–32.
- [Lüdike, 2012] Lüdike, N. (2012). *Ein Ventilatorsystem zur Simulation von Wind in virtuellen Welten*. Bachelorarbeit, Universität Bielefeld.
- [Massie und Salisbury, 1994] Massie, T. H. und Salisbury, J. K. (1994). The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Volume 55/1, Seiten 295–300. IOS Press.
- [Meehan et al., 2002] Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., und Brooks, Jr., F. P. (2002). Physiological Measures of Presence in Stressful Virtual Environments. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '02*, Seiten 645–652, New York, NY, USA. ACM.
- [Meehan et al., 2005] Meehan, M., Razzaque, S., Insko, B., Whitton, M., und Brooks, Frederick P., J. (2005). Review of Four Studies on the Use of Physiological Reaction as a Measure of Presence in Stressful Virtual Environments. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 30:239–258.
- [Meerhoff, 2013] Meerhoff, A. (2013). *A Stressful Virtual Environment – Comparison between HMD and CAVE*. Bachelorarbeit, Universität Bielefeld.

- [Moon und Kim, 2004] Moon, T. und Kim, G. J. (2004). Design and Evaluation of a Wind Display for Virtual Reality. In *VRST '04 Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Seiten 122 – 128.
- [Mori, 1970] Mori, M. (1970). Bukimi no tani [The uncanny valley]. *Energy*, 7(4):33–35.
- [Mori et al., 2012] Mori, M., MacDorman, K., und Kageki, N. (2012). The uncanny valley [from the field]. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 19(2):98 –100.
- [Nguyen, 2012] Nguyen, N. (2012). *Modellierung von peripersonalem Raum und Interaktionsraum durch ein Körperschema für humanoide Agenten*. PhD thesis, Universität Bielefeld.
- [Nolte, 1998] Nolte, R. (1998). Stereophone Audio Computing Engine – SpACE. Diplomarbeit, Technische Fakultät, Universität Bielefeld.
- [Oculus, 2012] Oculus (2012). Oculus Rift – Virtual Reality Headset for 3D-Gaming. Zuletzt besucht am 04.03.2014.
- [Ostermayer, 2008] Ostermayer, D. (2008). *Kontinuierliche Verbesserung von Produktionsprozessen mit Virtual Reality-Technologie*. Technische Universität Kaiserslautern.
- [Patrick, 1990] Patrick, N. J. (1990). *Design, Construction, and Testing of a Fingertip Tactile Display for Interaction with Virtual and Remote Environments*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [Pfeiffer, 2013] Pfeiffer, T. (2013). Visuelle Aufmerksamkeit in Virtueller und Erweiterter Realität: Integration und Nutzung im Szenengraphen. Volume 311 of *11. Paderborner Workshop Augmented and Virtual Reality in der Produktentstehung*, Seiten 295–307. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn.
- [Pfeiffer und Latoschik, 2007] Pfeiffer, T. und Latoschik, M. (2007). Interactive Social Displays. In *Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2007*.
- [Pfeiffer-Leßmann, 2010] Pfeiffer-Leßmann, N. (2010). *Kognitive Modellierung von Kooperationsfähigkeiten für einen künstlichen Agenten*. PhD thesis, Universität Bielefeld.
- [Phong, 1975] Phong, B. T. (1975). Illumination for Computer Generated Pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317.



- [Piateski und Frawley, 1991] Piateski, G. und Frawley, W. (1991). *Knowledge discovery in databases*. MIT press.
- [Pulkki, 1997] Pulkki, V. (1997). Virtual Sound Source Positioning using Vector Base Amplitude Panning. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(6):456–466.
- [Quillan, 1966] Quillan, M. R. (1966). Semantic memory. Technical report, DTIC Document.
- [Rabe und Wachsmuth, 2013] Rabe, F. und Wachsmuth, I. (2013). Enhancing Human Computer Interaction with Episodic Memory in a Virtual Guide. Volume 8007 of *Human-Computer Interaction: Interaction Modalities and Techniques, Part IV, HCII 2013*, Seiten 117–125. Springer.
- [Regenbrecht, 2000] Regenbrecht, H. (2000). *Faktoren für Präsenz in virtueller Architektur*. Bauhaus Universität Weimar, Deutschland.
- [Renner, 2011] Renner, P. (2011). *Natürliche Interaktion in der Virtuellen Realität*. Bachelorarbeit, Universität Bielefeld.
- [Renner et al., 2010] Renner, P., Dankert, T., Schneider, D., Mattar, N., und Pfeiffer, T. (2010). Navigating and Selecting in the Virtual Supermarket: Review and Update of Classic Interaction Techniques. In *Virtuelle und Erweiterte Realität: 7. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR*, Seiten 71–82.
- [Roemert, 2011] Roemert (2011). Wahrnehmung des Menschen. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wahrnehmung\\_des\\_Menschen.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wahrnehmung_des_Menschen.png). Zuletzt besucht am 05.09.2014.
- [Schandry, 2011] Schandry, R. (2011). *Biologische Psychologie: Mit Online-Materialien*. Beltz.
- [Schubert et al., 2001] Schubert, T., Friedmann, F., und Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):266–281.
- [Schuemie et al., 2001] Schuemie, M. J., van der Straaten, P., Krijn, M., und van der Mast, C. A. (2001). Research on Presence in Virtual Reality: A Survey. *Cyberpsychology and Behavior*, 4(2):183–201.

- [Shen et al., 2005] Shen, Q., Gausemeier, J., Bauch, J., und Radkowski, R. (2005). A Cooperative Virtual Prototyping System for Mechatronic Solution Elements Based Assembly. *Advanced Engineering Informatics*, 19(2):169–177.
- [Sheridan, 1994] Sheridan, T. (1994). Further Musings on the Psychophysics of Presence. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1994. 'Humans, Information and Technology', 1994 IEEE International Conference on*, Volume 2, Seiten 1073 –1077.
- [Sheridan, 1992a] Sheridan, T. B. (1992a). Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):120–126.
- [Sheridan, 1992b] Sheridan, T. B. (1992b). *Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [Sherman und Judkins, 1992] Sherman, B. und Judkins, P. (1992). *Glimpses of Heaven, Visions of Hell: Virtual Reality and Its Implications*. Hodder & Stoughton Canada.
- [Sikström, 2009] Sikström, E. (2009). Do Variations Make the Sound Design More Realistic?: Optimizing Realism in Sound Design for Footsteps in Games.
- [Slater, 1999] Slater, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):560–565.
- [Slater und Steed, 2000] Slater, M. und Steed, A. (2000). A Virtual Presence Counter. *Presence*, 9(5):413–434.
- [Slater et al., 1995] Slater, M., Usoh, M., und Steed, A. (1995). Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2(3):201–219.
- [Smith, 2006] Smith, R. (2006). Open Dynamics Engine. <http://www.ode.org/>.
- [SoundBible, 2014] SoundBible (2014). Free sound clips, sound bites, and sound effects. <http://soundbible.com/>. Zuletzt besucht am 26.02.2014.
- [Steuer, 1992] Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42:73–93.

- [Sutherland, 1965] Sutherland, I. E. (1965). The Ultimate Display. In *Proceedings of the IFIP Congress*, Seiten 506–508.
- [Sutherland, 1968] Sutherland, I. E. (1968). A Head-mounted Three Dimensional Display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, AFIPS '68 (Fall, part I), Seiten 757–764, New York, NY, USA. ACM.
- [Sánchez und Lumbreras, 1999] Sánchez, J. und Lumbreras, M. (1999). Virtual Environment Interaction Through 3D Audio by Blind Children. *Cyberpsy., Behavior, and Soc. Networking*, 2(2):101–111.
- [Teitel, 1990] Teitel, M. A. (1990). The Eyeophone: A head-mounted stereo display. In *SC-DL tentative*, Seiten 168–171. International Society for Optics and Photonics.
- [Usoh et al., 1999] Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M., und Brooks Jr, F. P. (1999). Walking > Walking-in-Place > Flying, in Virtual Environments. In *Siggraph*, Volume 99, Seiten 359–364.
- [Usoh et al., 2000] Usoh, M., Catena, E., Arman, S., und Slater, M. (2000). Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):497–503.
- [Wachs et al., 2011] Wachs, J. P., Kölsch, M., Stern, H., und Edan, Y. (2011). Vision-Based Hand-Gesture Applications. *Communications of the ACM*, 54(2):60–71.
- [Wachsmuth, 1994] Wachsmuth, I. (1994). How useful are virtual worlds? Volume 3: Linkage and developing countries of *Proceedings of the IFIP 13th World Computer Congress. IFIP transactions: A ; 53*, Seiten 191–192. North-Holland.
- [Wachsmuth, 1998] Wachsmuth, I. (1998). Das aktuelle Schlagwort: Virtuelle Realität. *Künstliche Intelligenz*, 98(1).
- [Wachsmuth und Cao, 1995] Wachsmuth, I. und Cao, Y. (1995). *Interactive Graphics Design with Situated Agents*, Seiten 73–85. Graphics and Robotics. Springer.
- [Wachsmuth et al., 1994] Wachsmuth, I., Krüger, W., und Cao, Y. (1994). Virtuelle Räume. *KI – Künstliche Intelligenz*, 8(1):26–33.

- [Wachsmuth et al., 1995] Wachsmuth, I., Lenzmann, B., und Jung, B. (1995). Communicating with Virtual Environments - A Survey of Recent Work at the University of Bielefeld. Modeling - Virtual Worlds - Distributed Graphics MVD'95, Seiten 93–97. Infix-Verlag.
- [Wachsmuth und Leßmann, 2002] Wachsmuth, I. und Leßmann, N. (2002). Eine kognitiv motivierte Architektur für einen anthropomorphen künstlichen Kommunikator. Tagungsbeiträge Human Centered Robotic Systems 2002, Seiten 141–148. Universität Karlsruhe (TH).
- [Walters et al., 2008] Walters, M. L., Syrdal, D. S., Dautenhahn, K., Te Boekhorst, R., und Koay, K. L. (2008). Avoiding the uncanny valley: Robot Appearance, Personality and Consistency of Behavior in an Attention-Seeking Home Scenario for a Robot Companion. *Autonomous Robots*, 24(2):159–178.
- [Wang, 2002] Wang, G. G. (2002). Definition and Review of Virtual Prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering(Transactions of the ASME)*, 2(3):232–236.
- [Weizenbaum, 1966] Weizenbaum, J. (1966). ELIZA - a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Commun. ACM*, 9(1):36–45.
- [Wiebusch und Latoschik, 2012] Wiebusch, D. und Latoschik, M. E. (2012). Enhanced Decoupling of Components in Intelligent Realtime Interactive Systems using Ontologies. In *Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS), 2012 5th Workshop on*, Seiten 43–51. IEEE.
- [Witmer und Singer, 1998] Witmer, B. G. und Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence*, 7(3):225–240.
- [Yamada et al., 2006] Yamada, T., Yokoyama, S., Tanikawa, T., Hirota, K., und Hirose, M. (2006). Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment. In *VR*, Seiten 199–206.
- [Yanagida et al., 2004] Yanagida, Y., Kawato, S., Noma, H., Tomono, A., und Tetsutani, N. (2004). Projection-Based Olfactory Display with Nose Tracking. In *VR*, Seiten 43–50.

- [Zeltzer, 1992] Zeltzer, D. (1992). Autonomy, Interaction, and Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):127–132.
- [Zimmons und Panter, 2003] Zimmons, P. und Panter, A. (2003). The Influence of Rendering Quality on Presence and Task Performance in a Virtual Environment. In *Virtual Reality, 2003. Proceedings. IEEE*, Seiten 293–294. IEEE.
- [Zimmons, 2004] Zimmons, P. M. (2004). *The Influence of Lighting Quality on Presence and Task Performance in Virtual Environments*. PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill.



# Anhang





# Anhang **A**

## Originalfragebögen

Die folgenden Fragebögen bilden die Grundlage für die in der vorliegenden Dissertation verwendeten Fragebögen (vgl. Kapitel 6 und Anhang B). Es handelt sich dabei um am meisten eingesetzten Präsenzfragebögen.

### Presence Questionnaire

<b>The Rating Question</b>
----------------------------

If your level of presence in the real world is "100" and your level of presence is "1" if you lack presence, rate your level of presence in this virtual world (presence is a "feeling of being there"). Enter a number 1-100	_____
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

<b>The Other Presence Questions</b>
-------------------------------------

	poor	fair	good	very good	excellent
How strong was your sense of presence in the virtual environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How strong was your sense of "being there" in the virtual environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How strong was your sense of inclusion in the virtual environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How aware were you of the real world surroundings while moving through the virtual world (i.e., sounds, room temperature, other people, etc.)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In general, how realistic did the virtual world appear to you?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How realistically were you moved through the virtual world?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
With what degree of ease were you able to look around the virtual environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you feel that you could have reached into the virtual world and grasped an object?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
What was your overall comfort level in this environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
What was your overall enjoyment level in the virtual environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Please rate your sense of being there in the computer generated world?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
To what extent were there times during the experience when the computer-generated world became the reality for you and you almost forgot about the "real world" outside?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
What was the quality of the visual display?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

---

**Presence Questionnaire – The Pit Experiment**

**Virtual Environment Questionnaire**

ID # \_\_\_\_\_

**Instructions:** Using the scales provided below, please indicate your response to each question or fill in the blank.

The following questions relate to your experience.

1. Please rate the extent to which you were aware of background sounds in the real laboratory in which this experience was actually taking place. Rate this on the scale from 1 to 7 (where for example 1 means that you were hardly aware at all of the background sounds and 7 means that you were very much aware of the background sounds):

***While in the virtual reality I was aware of background sounds from the laboratory:***

1       2       3       4       5       6       7  
Not at      Very  
All      Much

2. Please rate your sense of being in the room that has the window on the following scale from 1 to 7, where 7 represents your normal experience of being in a place.

***I had a sense of being in the room with the window:***

1       2       3       4       5       6       7  
Not at      Very  
All      Much

3. Gender, Age, and Race/ Ethnicity:

Male       Female      Age: \_\_\_\_\_

Race/ Ethnicity (please check *one*):

- American Indian or Alaskan Native  
 Asian or Pacific Islander  
 Black, not of Hispanic Origin  
 Hispanic  
 White, not of Hispanic Origin  
 Other

**Immersion Tendency Questionnaire Item Stems (Version 2.0)**

Situation	Never <span style="float: right;">often</span>						
Do you ever get extremely involved in projects that are assigned to you by your boss or your instructor?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How easily can you switch your attention from the task in which you are currently involved to a new task?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How frequently do you get emotionally involved (angry, sad, or happy) in the news stories that you read or hear?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How well do you feel today?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you easily become deeply involved in movies or TV dramas?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you ever become so involved in a television program or book that people have problems getting your attention?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How mentally alert do you feel at the present time?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you ever become so involved in a movie that you are not aware of things happening around you?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How frequently do you find yourself closely identifying with the characters in a story line?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you ever become so involved in a video game that it is as if you are inside the game rather than moving a joystick and watching the screen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
On average, how many books do you read for enjoyment in a month?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
What kind of books do you read most frequently? (CIRCLE ONE ITEM ONLY!)	Spy novels      Fantasies      Science Fiction      Adventure Roman novels      Historical novels      Westerns      Mysteries Other fiction      Biographies      Autobiographies Other non-fiction						
How physically fit do you feel today?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How good are you at blocking out external distractions when you are involved in something?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
When watching sports, do you ever become so involved in the game that you react as if you were one of the players?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you ever become so involved in a daydream that you are not aware of things happening around you?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Do you ever have dreams that are so real that you feel disoriented when you awake?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Presence Questionnaire Item Stems (Version 2.0)**

Situation							
	Never			often			
How much were you able to control events?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How responsive was the environment to actions that you initiated (or performed?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How natural did your interactions with the environment seem?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How completely were all of your senses engaged?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How much did the visual aspects of the environment involve you?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How much did the auditory aspects of the environment involve you?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How natural was the mechanism which controlled movement through the environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How aware were you of events occurring in the real world around you?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How aware were you of your display and control devices?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How compelling was your sense of objects moving through space?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How inconsistent or disconnected was the information coming from your various senses?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How much did your experiences in the virtual environment seem consistent with your real-world experiences?	Spy novels      Fantasies      Science Fiction      Adventure Roman novels    Historical novels    Westerns              Mysteries Other fiction      Biographies      Autobiographies Other non-fiction						
Were you able to anticipate what would happen next in response to the actions that you performed?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How completely were you able to actively survey or search the environment using vision?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How well could you identify sounds?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How well could you localize sounds?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How well could you actively survey or search the virtual environment using touch?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How compelling was your sense of moving around inside the virtual environment?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
How closely were you able to examine objects?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



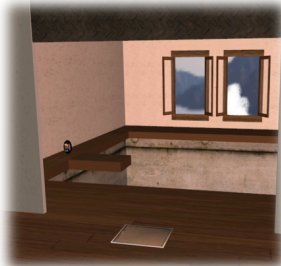
Anhang **B**

Material der durchgeführten Studie

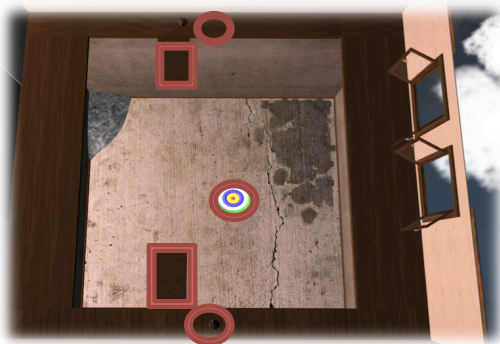
Ausblick aus dem Fenster



Die Tür zwischen den Räumen



Der virtuelle Gong



Virtueller Abgrund mit Planken, Bällen und Zielscheibe



Trainingsraum mit Ball, Zielscheibe, Bild und Möbeln



---

## Einverständniserklärung

Bitte beachten Sie, dass Ihre Informationen nur in anonymisierter Form weiterverarbeitet werden. Der/Die Versuchsleiter/-leiterin garantiert den Schutz Ihrer Daten. Es besteht kein Risiko körperlichen oder geistigen Schaden zu nehmen. Die Teilnahme geschieht freiwillig und kann zu jedem Zeitpunkt von Ihnen abgebrochen werden. Dadurch entsteht Ihnen kein Nachteil.

Ich bin damit einverstanden, an einer Studie zum Thema **Wahrnehmung von Virtuellen Welten** teilzunehmen.

Ich bin damit einverstanden, dass von mir Foto- und Videomaterial im Rahmen der Studie erstellt wird

Ich bin ausreichend über den Zweck und Ablauf der Untersuchung informiert worden.

Name: \_\_\_\_\_

Anschrift: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Telefon: \_\_\_\_\_

E-Mail: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ort/Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

- Ich bin damit einverstanden, dass Fotos und Ausschnitte aus den Videoaufzeichnungen in Berichten und Präsentationen verwendet werden. Bezüge zu anderen persönlichen Daten werden dabei nicht hergestellt.

### Hinweise zum Datenschutz:

Die Erfassung, Speicherung und Verarbeitung personenbezogener Daten insbesondere medizinischer Daten ist laut Bundesdatenschutzgesetz dann erlaubt, wenn der Betroffene dazu schriftlich sein Einverständnis gibt und dieses mit seiner Unterschrift bekundet. Dieses muss nach dessen freien Willen geschehen, wobei der Verwendungszweck der Daten eindeutig bekannt sein muss.

**Ferner hat der Betroffene jeder Zeit das Recht, seine personen-bezogenen Daten einzusehen, zu ändern oder ohne Angabe von Gründen ganz oder teilweise löschen zu lassen.**

## B. Material der durchgeführten Studie

---

Allgemeine Daten:

Versuchsperson:  Datum:  Testleiter:

**Nachfolgend sehen Sie einige Fragen die sich auf Ihre persönlichen Daten und Erfahrungen im Umgang mit Computern beziehen.**

Männlich  Weiblich

Alter:

Ihre dominante Hand ist:  Rechts  Links

Sie tragen:  Brille  Kontaktlinsen  keine Sehhilfe

Ihr beruflicher Status ist:

- Schüler/in
- Student/in der Fachrichtung:
- an der Universität beschäftigt im Fachbereich:
- nicht an der Universität beschäftigt, sondern:

Wie viele Stunden verbringen Sie in einer durchschnittlichen Woche am Computer?

Wie viele Stunden verbringen Sie in einer durchschnittlichen Woche mit Computerspielen?

Wie viel Erfahrung haben Sie bereits mit virtueller Realität gesammelt?  
keine  wenig  etwas  viel  sehr viel

Falls Sie bereits Erfahrung(en) mit virtueller Realität gesammelt haben, beschreiben Sie kurz die Art der Erfahrung(en):

Fragebogen 1:

Versuchsperson:

**Nachfolgend sehen Sie einige Fragen die sich auf Ihr alltägliches Verhalten beziehen. Bitte kreuzen Sie jeweils das Kästchen an, welches Ihrem Verhalten am nächsten kommt.**

<b>Situation</b>	<b>Nie</b>						<b>sehr oft</b>
Lassen Sie sich leicht tief in Spiel- oder Fernsehfilme hineinziehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind Sie manchmal so sehr in eine Fernsehsendung oder in ein Buch vertieft, dass andere Menschen nur schwer ihre Aufmerksamkeit auf sich ziehen können?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Waren Sie jemals so sehr in einen Film vertieft, dass Ihnen die Dinge, die um Sie herum passierten, nicht mehr bewusst waren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie oft identifizieren Sie sich stark mit den Charakteren einer Geschichte?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fühlten Sie sich jemals so sehr in ein Computerspiel verwickelt, dass Sie eher das Gefühl hatten, Sie seien Teil des Spiels, als dass Sie nur einen Joystick bewegen und den Bildschirm beobachten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn Sie sich Sportübertragungen ansehen: Sind Sie manchmal so sehr in ein Spiel vertieft, dass Sie wie einer der Spieler reagieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Sie manchmal so sehr in einen Tagtraum hineingezogen, dass Sie sich der Dinge um Sie herum nicht mehr bewusst sind?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben Sie manchmal Träume, die so real sind, dass Sie sich beim Erwachen desorientiert fühlen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat jemals eine Jagd- oder Kampfszene in Film oder Fernsehen Aufregung bei Ihnen ausgelöst?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat Sie jemals etwas in einer Fernsehsendung oder in einem Spielfilm geängstigt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ist es Ihnen jemals passiert, dass Sie nach einem beängstigenden Film lange Zeit besorgt oder verängstigt waren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind Sie manchmal so mit einer Sache beschäftigt, dass Sie die Zeit vergessen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## B. Material der durchgeführten Studie

---

Fragebogen 2: Prä   
 5: Post

Versuchsperson:

**Nachfolgend ist eine Liste mit Symptomen, die bei der Benutzung von virtuellen Umgebungen auftreten können. Bitte kreuzen Sie an wie ausgeprägt diese Symptome jetzt, d.h. in diesem Moment bei Ihnen vorhanden sind.**

Symptom	Ausprägung			
	Nicht vorhanden	Etwas	Deutlich	Sehr stark
Allgemeines Unwohlsein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Müdigkeit <sup>1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Überanstrengte Augen <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwierigkeiten beim Scharfsehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Erhöhter Speichelfluss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Übelkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konzentrationschwierigkeiten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Druckgefühl im Kopf <sup>3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Getrübtes Sehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwindel bei geöffneten Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwindel bei geschlossenen Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Drehschwindel <sup>4</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wahrnehmung des Magens <sup>5</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufstoßen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<sup>1</sup> Schlaptheit oder Erschöpfung des Körpers

<sup>2</sup> Schlaptheit oder Schmerz der Augen

<sup>3</sup> Ein dumpfes Gefühl, ähnlich einer Grippe

<sup>4</sup> Die Umgebung scheint um Sie herum zu wirbeln

<sup>5</sup> Ein Gefühl kurz vor Übelkeit

Fragebogen 3:

Versuchsperson:

**Nachfolgend ist eine Liste von Situationen, die Höhe betreffen, zusammengestellt. Stellen Sie sich bitte vor, wie ängstlich Sie sich fühlen würden wenn sie jetzt, d.h. in diesem Moment den beschriebenen Situationen ausgesetzt wären.**

Situation	Angstgefühl						
	Überhaupt keins		leicht		mäßig		Sehr stark
Vom untersten Sprungbrett in einem Schwimmbad ins Wasser tauchen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Über Steine steigend einen Fluss überqueren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Von mehreren Stufen einer Wendeltreppe aus nach unten schauen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf einer gegen eine Hauswand gelehnten Leiter auf Höhe der zweiten Etage stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In einem Theater an der Brüstung des zweiten Balkons sitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Riesenrad fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beim Wandern einen steilen Anstieg hinaufgehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine Flugreise unternehmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In der dritten Etage an einem offenen Fenster stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine Fußgängerbrücke über einer Autobahn überqueren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Über eine hohe Brücke fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Von einem Fenster entfernt im 15. Stock eines Bürogebäudes stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fensterputzer auf einem Gerüst im 10. Stock beobachten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf dem Bürgersteig über ein Lüftungsgitter gehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In einer U-Bahn an der Kante des Bahnsteigs stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine Feuerleiter zur dritten Etage hinaufsteigen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf einem Balkon im 10. Stockwerk stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mit dem Lift in die 50. Etage eines Hochhauses fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf einem Stuhl stehen um etwas aus einem Regal zu holen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Über die Landungsbrücke auf einen Ozeandampfer gehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## B. Material der durchgeführten Studie

---

Fragebogen 4:

Versuchsperson:

**Nachfolgend sind noch einmal die gleichen Situationen aufgeführt. Nachdem Sie die Situationen nach dem Grad der empfundenen Angst eingeschätzt haben, schätzen Sie nun bitte ein, inwieweit Sie die Situation vermeiden würden.**

Situation	Ich würde die Situation nicht meiden	Ich würde die Situation meiden	Ich würde dies auf keinen Fall tun
Vom untersten Sprungbrett in einem Schwimmbad ins Wasser tauchen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Über Steine steigend einen Fluss überqueren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Von mehreren Stufen einer Wendeltreppe aus nach unten schauen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf einer gegen eine Hauswand gelehnte Leiter auf Höhe der zweiten Etage stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In einem Theater an der Brüstung des zweiten Balkons sitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Riesenrad fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beim Wandern einen steilen Anstieg hinaufgehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine Flugreise unternehmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In der dritten Etage an einem offenen Fenster stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine Fußgängerbrücke über einer Autobahn überqueren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Über eine hohe Brücke fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Von einem Fenster entfernt im 15ten Stock eines Bürogebäudes stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fensterputzer auf einem Gerüst im 10. Stock beobachten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf dem Bürgersteig über ein Lüftungsgitter gehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
In einer U-Bahn an der Kante des Bahnsteigs stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine Feuerleiter zur dritten Etage hinaufsteigen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf einem Balkon im 10ten Stockwerk stehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mit dem Lift in die 50. Etage eines Hochhauses fahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auf einem Stuhl stehen um etwas aus einem Regal zu holen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Über die Landungsbrücke auf einen Ozeandampfer gehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fragebogen 6:

Versuchsperson:

**Nachfolgend sehen Sie einige Fragen die sich auf das gesamte Experiment beziehen. Bitte kreuzen Sie jeweils das Kästchen an, welches Ihrer Erfahrung am nächsten kommt.**

<b>Situation</b>							
Wie sehr haben Sie die Hintergrundgeräusche des Labors, in dem das Experiment stattgefunden hat, wahrgenommen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sehr stark						überhaupt nicht
Wie sehr haben Sie sich in dem möblierten Raum anwesend gefühlt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Überhaupt nicht						Sehr stark
Fanden Sie es sehr kompliziert oder eher sehr leicht sich in der virtuellen Welt fortzubewegen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sehr kompliziert						Sehr leicht
In welchem Ausmaß gab es Zeiten, in denen die virtuellen Räume für Sie „real“ wurden und Sie fast vergessen haben, dass Sie sich in einem Labor für virtuelle Realität befinden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nie						Fast die ganze Zeit
Wie kompliziert oder einfach war es für Sie von einem Punkt in der Welt zu einem anderen zu kommen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sehr kompliziert						Sehr einfach
In welchem Ausmaß war Ihre Reaktion, als Sie den Abgrund hinunter geschaut haben, ähnlich zu einer vergleichbaren Situation in der echten Welt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Überhaupt nicht ähnlich						Sehr ähnlich
Wie natürlich war es für Sie sich in der Welt zu bewegen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gar nicht natürlich						Sehr natürlich
Wie stark war Ihre Angst herunterzufallen als Sie auf der virtuellen Planke standen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gar keine Angst						Sehr viel Angst
Wenn Sie zurückdenken an das Experiment, kommen Ihnen die Räume mehr vor wie Bilder, die Sie gesehen haben oder eher wie Orte, die Sie besucht haben?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gesehene Bilder						besuchte Orte
Während des gesamten Experiments: Welcher Eindruck war stärker, das Gefühl sich in den virtuellen Räumen zu befinden oder das Gefühl sich in dem Labor für virtuelle Realität zu befinden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	reales Labor						virtuelle Räume
Wie sehr ähnelt die <i>Struktur Ihrer Erinnerung</i> <sup>1</sup> an die virtuellen Räume den Erinnerungen an andere Orte, die Sie heute besucht haben?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Überhaupt nicht						Sehr ähnlich
Wie sehr haben Sie sich in dem Raum mit dem Abgrund anwesend gefühlt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Überhaupt nicht						Sehr stark
Wie oft während des Experiments haben Sie daran gedacht, dass Sie eigentlich in einem Labor für virtuelle Realität stehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Die meiste Zeit						Nie

<sup>1</sup> Zu der „Struktur einer Erinnerung“ zählen beispielsweise wie gut Sie die Räume vor sich sehen können, ob die Erinnerung in Farbe oder schwarz-weiß ist, ob die Erinnerung lebendig und realistisch erscheint, ob Sie sich Größe und Lage der Räume vorstellen können und ob Sie ein Panoramabild der Räume vor Ihrem inneren Auge sehen können.

## B. Material der durchgeführten Studie

---

Fragebogen 7:

Versuchsperson:

**Nachfolgend sehen Sie einige Fragen die sich auf Ihr Erlebnis in den virtuellen Räumen beziehen. Bitte beantworten Sie die Fragen so ausführlich wie möglich.**

1. Wie hat Ihnen das Experiment gefallen? Warum?

2. Der Ausblick aus dem Fenster war:

Sehr schön  okay  nicht schön  weiß ich nicht

3. Listen Sie alle Objekte aus beiden Räumen auf, an die Sie sich erinnern können:

4. Wie haben Sie die Schrittgeräusche empfunden?

passend  okay  unpassend  es gab keine Schrittgeräusche

5. Welche Objekte lagen auf dem Tisch im ersten Raum?

6. Der Luftzug als Sie den Raum mit dem Abgrund betreten haben war:

passend  okay  unpassend  es gab keinen Luftzug

7. Wie viele Bilder hingen an den Wänden der beiden Räume und was haben Sie dargestellt?

8. Die Musik aus dem Radio war:

passend  okay  unpassend  es gab keine Musik

9. Die Fenster in dem Raum mit dem Abgrund waren:

geöffnet  auf Kipp  geschlossen  es gab keine Fenster

10. Wie groß schätzen Sie den Trainingsraum? m x m

11. Wie tief war der Abgrund? m

12. Haben Sie weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?