



FAKULTÄT FÜR GEISTES-,
SOZIAL- UND ERZIEHUNGS-
WISSENSCHAFTEN

Perzeption in virtueller Realität als Aggregat von Visualisierung und Interaktion

Marcel Martsch, Oliver Wienert, Steffen Liefold & Klaus Jenewein

IBBP-Arbeitsbericht Nr. 77

Juli 2010

ISSN 1437-8493

Arbeitsberichte des Instituts für Berufs- und Betriebspädagogik

Herausgeber:

Institut für Berufs- und Betriebspädagogik (IBBP)
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Prof.'en Dr. Dietmar Frommberger, Dr. Klaus Jenewein, Dr. Sibylle Peters

Anschrift:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Geistes-, Sozial- und Erziehungswissenschaften
Institut für Berufs- und Betriebspädagogik (IBBP)
Zschokkestr. 32
D-39104 Magdeburg

Tel.: +49 391 6716623

Fax: +49 391 6716550

Email: ibbp@ovgu.de

ISSN 1437-8493

Perzeption in virtueller Realität als Aggregat von Visualisierung und Interaktion

Marcel Martsch, Oliver Wienert, Steffen Liefold & Klaus Jenewein

IBBP-Arbeitsbericht Nr. 77

Juli 2010

ISSN 1437-8493

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Virtuelle Realität	3
2.1 Definition und Eigenschaften virtueller Realität	3
2.2 Technische Realisierung von Virtueller Realität.....	3
2.2.1 Anzeigesysteme (<i>virtual environment display</i>)	4
2.2.2 Interaktionssysteme (<i>real environment sensing</i>)	6
2.2.3 Steuerungs- und Kontrollsysteme (<i>virtual environment control</i>)	10
2.3 Wahrnehmung in Virtueller Realität	10
2.3.1 <i>Sense of presence</i> - Präsenzerleben.....	11
2.3.2 <i>Usability</i> - Gebrauchstauglichkeit	12
2.3.3 <i>Simulator sickness</i>	12
2.3.4 Messung der Konstrukte	13
2.3.4.1 <i>Sense of presence</i>	13
2.3.4.2 Präsenzbereitschaft.....	14
2.3.4.3 <i>Usability</i>	14
2.3.4.4 <i>Simulator sickness</i>	16
2.4 Zusammenfassung und Fragestellungen	16
2.4.1 Hypothesen	19
3. Methode	21
3.1 Stichprobe	21
3.2 Stimulusmaterial und Instruktion.....	21
3.3 Experimentalaufbau	23
3.3.1 Versuchsablauf	23
3.3.1.1 Fragebogenverfahren 1	23
3.3.1.2 Experimentelles Setting - Versuchsdesign.....	25
3.3.1.3 Fragebogenverfahren 2	26
3.3.2 Technische Parameter der Virtuellen Realität.....	27
3.3.2.1 <i>Virtual environment display</i>	27
3.3.2.2 <i>Virtual environment control</i>	28
3.3.2.3 <i>Real environment sensing</i>	30
3.4 Statistische Auswertung.....	30
4. Ergebnisse	31
4.1 Kontrollvariablen	31
4.1.1 Performanz	31

4.1.2 <i>Sense of presence, usability</i>	32
4.2 Reliabilität	33
4.2.1 Präsenzbereitschaft	33
4.2.2 <i>Sense of presence, usability</i>	33
4.3 Hypothesenprüfung	33
4.3.1 Performanz	33
4.3.2 <i>Sense of presence</i>	35
4.3.3 <i>Usability</i>	37
4.3.4 <i>Simulator sickness</i>	37
4.3.5 Zusammenhang zwischen abhängigen Variablen.....	38
5. Diskussion	39
5.1 Performanz	39
5.2 <i>Sense of presence</i>	42
5.3 Performanz und <i>sense of presence</i>	43
5.4 <i>Usability</i>	45
5.5 Performanz und <i>usability</i>	45
5.6 <i>Usability</i> und <i>sense of presence</i>	46
5.7 <i>Simulator sickness</i>	47
5.8 Schlussfolgerung und Ausblick	47
5. Literatur	49

1. Einleitung

Ein Blick auf die vorliegende Arbeit, welche in Textform die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung beinhaltet, zeigt - ebenso wie der Blick in die Geschichte -, dass sich die Menschen seit jeher verschiedener Artefakte bedienen, um die externe Realität abzubilden. Zu den traditionellen Möglichkeiten gehören neben der Schrift vor allem die Sprache, Bilder und Symbole, welche in der Neuzeit um Photographien, Filme, Funk- und Fernsehen sowie die Computertechnologie ergänzt wurden. Von einigen bemerkenswerten Entwicklungen des vergangenen Jahrhunderts abgesehen (vgl. Land, 1954; Reeves, 1999), bereicherte vor allem Ivan Sutherland in den 60er Jahren mit der Entwicklung der ersten interaktiven Graphikanwendungen sowie der Konstruktion des ersten *Head-Mounted-Display* (vgl. Kap. 2.2.1) die Menschheit um ein weiteres technisches Artefakt, die virtuelle Realität (VR), wengleich er den Begriff selbst nicht verwendete, sondern von der virtuellen Welt sprach. Die Tragweite seiner Pionierarbeit beschreibt Sutherland als „[...] die Chance mit Konzepten vertraut zu werden, die in der physischen Welt nicht realisierbar wären. Es ist ein Spiegel in das mathematische Wunderland.“ (1965, p. 1, Übersetzung vom Autor).

Dieser Meilenstein auf dem Gebiet der immersiven Technologien öffnete ein neues Kapitel in der Mensch-Maschine-Kommunikation, denn nun war es möglich, virtuelle Umgebungen zu schaffen, innerhalb derer die Nutzer nicht länger passive Betrachter sind, sondern zu aktiven Teilnehmern einer künstlich geschaffenen dreidimensionalen Welt werden. Wengleich die weiteren Forschungsbestrebungen aufgrund technischer Restriktionen in den 70er Jahren wiederholt ausgesetzt werden mussten, erlebte die Virtuelle Realität in den 80er Jahren eine Renaissance (vgl. Bormann, 1994, S. 41), die sich bis in die Gegenwart fortsetzt, wobei sie sich sukzessive vom wissenschaftlichen Spielzeug zur Zukunft der Computertechnologie entwickelt hat.

Die mit der kontinuierlichen Forschung einhergehenden technologischen Innovationen sorgen nicht nur dafür, dass die Grenzen von Realität und Repräsentation mehr und mehr verschwimmen, sondern gaben auch den Impuls dafür, dass die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von VR-Anwendungen auch außerhalb der Forschungslaboratorien erkannt wurden. Folgerichtig finden die virtuellen Szenarien bereits heute in verschiedenen Kontexten Anwendung. Neben den militärischen Applikationen (Flugsimulatoren etc.) steht vor allem der *architectural walkthrough* (Brooks, Airey, Alspaugh & Bell, 1992) für den Durchbruch der VR-Technologien im Bereich der zivilen Anwendung (vgl. Bowman, 1995). Heute wird VR auch im Bereich der Psychotherapie (Hodges, Rothbaum, Kooper, Opdyke, Meyer, North, de Graff & Williford, 1995), Medizin (Seymour, 2008), Unterhaltungsindustrie (Badique, Cavazza, Klinker, Mair, Sweeney, Thalmann & Thalmann, 2002), Simulation und Training (Tate, Sibert, & King, 1997) sowie der Aus- und Weiterbildung eingesetzt. Insbesondere in den letztgenannten Qualifizierungsmaßnahmen sehen viele Experten ein enormes Potential der virtuellen Technologien. Die Vorteile der virtuellen Umgebungen in Lehr-Lern-Arrangements liegen dabei auf der Hand. Die Visualisierung in VR ermöglicht es, komplexe Prozesse Schritt für Schritt aufzubereiten und an das Tempo der Lernenden anzupassen. Weiterhin erlauben VR-Applikation intransparente Vorgänge der Realität zu veranschaulichen, was ebenso zu einem besseren Verständnis beitragen kann wie das Ausblenden irrelevanter Details, um die Aufmerksamkeit der Anwender auf die Kernaspekte auszurichten. Darüber hinaus eröffnen die virtuellen Umgebungen die Möglichkeit des selbständigen Lernens und Trainierens, wobei das Szenario beliebig oft wiederholt werden kann und auftretende Fehler für Mensch und Maschine folgenlos bleiben. Demnach spart der Einsatz von VR wichtige Ressourcen des Ausbildungsunternehmens und verhindert Produktionsausfälle, was ein wichtiges Kriterium im Hinblick auf das Zeit-, Kosten- und Qualitätsmanagement der Unternehmen darstellt.

Wenngleich die vorangegangenen Ausführungen die vielfältigen Perspektiven des Mediums VR hervorheben, zeigen sie gleichzeitig, dass es sich noch immer um einen jungen Forschungszweig handelt, der neben großem Potential auch eine Reihe komplexer Herausforderungen in sich birgt. Von den rein technischen Fragestellungen abgesehen, welchen sich in erster Linie die Ingenieurwissenschaften und Informatik annehmen, wird der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine eine immer größer werdende Bedeutung beigemessen. Die Gründe dafür sind augenfällig, denn auch die technisch anspruchsvollsten VR-Umgebungen müssen sich der Bewertung durch die Anwender stellen und letztlich als Medium angenommen werden.

An dieser Stelle setzt das Teilprojekt „Wahrnehmung und Orientierung in virtueller und erweiterter Realität“ des interdisziplinären Forschungsvorhabens ViERforES „Virtuelle und erweiterte Realität für höchste Sicherheit und Zuverlässigkeit in eingebetteten Systemen“ an. Ziel des Projektes ist die Erforschung und Dokumentation von Szenarien zur Gestaltung von Mensch-System-Schnittstellen unter dem Gesichtspunkt der Optimierung von Wahrnehmung, Orientierung und Interaktion in unterschiedlichen VR-basierten Systemen, Interaktionsumgebungen und virtuellen Handlungsräumen. Das aus der Forschung resultierende Wissen soll - dem interdisziplinären Charakter entsprechend - in die Anwendungsbereiche transferiert werden, um Systementwickler und Ingenieure bei der Konstruktion virtueller Umgebungen zu unterstützen.

Dazu wurde zunächst ein forschungsmethodischer Ansatz entwickelt, der eine vergleichende Untersuchung von Visualisierungssystemen und Interaktionstechniken unter Berücksichtigung jener psychologischen Konstrukte erlaubt, denen im Kontext der Virtuellen Realität eine wichtige Bedeutung beigemessen wird. Die empirische Erprobung des experimentellen Forschungsinstrumentariums erfolgte im Magdeburger Virtual Development and Training Centre (VDTC) des Magdeburger IFF und den dort vorhandenen Validierungsumgebungen und -technologien.

Die zu Grunde liegenden theoretischen Annahmen und Modelle sowie das entwickelte Forschungsdesign und die Ergebnisse der Pilotstudie sind Inhalt des vorliegenden Arbeitsberichts.

*Das Geheimnis der Virtuellen Realität besteht
darin, dass das Gehirn Illusionen
aufnehmen möchte.
(Sherman & Judkins, 1993)*

2. Virtuelle Realität

2.1 Definition und Eigenschaften virtueller Realität

Die stetig wachsende Innovationsdynamik sorgt dafür, dass auf dem Markt fortlaufend neue und aufwendigere Technologien zu finden sind. Als Konrad Zuse, der als Vater des Computers gilt, 1938 mit dem Modell Z1 seine erste Rechenmaschine vorstellte (Rojas, 1998), war kaum denkbar, dass nur 70 Jahre später die Visionen der Informatik in Bereichen der Bio- und Quanten-Computer oder *Virtual Reality* liegen (vgl. Bruß, 2003; Buchholz & Kutrib, 1998; Ignatova, Martinez-Perez & Zimmermann, 2008). Der Terminus *Virtual Reality* - kurz VR - wurde Ende der 80er Jahre von Jaron Lanier geprägt, der nach einer zentralen Bezeichnung suchte, welche es erlaubt, die Ergebnisse seiner Forschungsaktivität zu subsumieren. Lanier, der bis heute als Pionier auf dem Gebiet der Virtuellen Realität gilt (Lanier & Biocchia, 1992), fixierte den Begriff damals auf „nicht mehr oder weniger als ein Abbild unserer physikalischen Umwelt auf einer neuen Ebene“ (1988, Übersetzung von Autoren). Im Zuge der weiteren Forschung wurde die Begriffsbestimmung Laniers immer weiter differenziert, wobei die Definitionen anfänglich vorrangig die konstitutiven technischen Merkmale fokussierten (vgl. Coates, 1992, Greenbaum, 1992).

Steuer (1992) kritisiert die technologiezentrierten Definitionen von VR, indem er auf die humanen Aspekte im Zusammenhang mit virtuellen Umgebungen verweist wie beispielsweise das „Gefühl sich in einer Umgebung zu befinden“ (Steuer, 1992, p. 74, Übersetzung von Autoren, vgl. auch Blascovich, 2002 zur Kritik an einer einzig auf technischen Aspekten basierenden Definition von VR). Folglich sind neben technischen Kriterien auch immer erlebnisbezogene Aspekte im Umgang mit VR zu konzeptualisieren, wonach folgende Definition die Arbeitsgrundlage der vorliegenden Arbeit bildet.

Virtuelle Realität ist eine computergestützte, dreidimensionale Umgebung in Echtzeit, die ein möglichst perfektes sensorisches Abbild der realen Umwelt assoziiert und interaktive Objekte beinhaltet. Der Anwender fühlt sich in der virtuellen Umgebung präsent und hat gleichzeitig die Möglichkeit, sich innerhalb der Szenerie zu bewegen, Perspektivwechsel vorzunehmen und die virtuelle Welt zu gestalten (vgl. Bullinger & Warnecke, 1994; Rheingold, 1991).

Den vorangegangenen Ausführungen folgend sind die Bestrebungen, die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu verbessern, unweigerlich an die gleichzeitige Betrachtung physikalischer Eigenschaften auf der einen und psychologischer Einflussgrößen auf der anderen Seite gekoppelt. Daher wird im Folgenden zunächst ein Überblick über die technischen Merkmale virtueller Umgebungen gegeben. Anschließend werden die psychologischen Konstrukte thematisiert, welche im Zusammenhang mit der Nutzung von VR stehen.

2.2 Technische Realisierung von Virtueller Realität

Ein Blick auf die heute zur Verfügung stehenden technischen Komponenten virtueller Umgebungen unterstreicht eindrucksvoll, dass sich der rasante technologische Fortschritt der vergangenen zwei

Jahrzehnte nicht zuletzt im Bereich der VR widerspiegelt. Gleichsam eröffnen die verschiedenen Computer-, Display- und Softwaretechnologien, Interaktionsmetaphern sowie Positionierungs- und Orientierungssysteme immer neue Möglichkeiten, in virtuelle Szenerien einzutauchen (Bullinger, Bauer & Braun, 1997; Kalawsky, 1993). Diese mediale Vielfalt der VR-Applikationen wird an den Eigenschaften der resultierenden virtuellen Umgebungen (Dreidimensionalität, Immersionsgrad, Dynamik der Darstellung, Intuition, Interaktivität etc.) differenziert, die in Abhängigkeit der technischen Basis variieren (Bullinger et al., 1997).

Unabhängig davon erfordert die technische Umsetzung von VR-Umgebungen grundsätzlich immer eine Kombination aus Anzeigesystem (*virtual environment display*), Eingabesystem (*virtual environment control*) und Systemsteuerung (*real environment sensing*), welche als Schnittstelle zwischen Eingabe- und Anzeigesystem fungiert (Grimsdale, 1992). Die Systemsteuerung erhält den Input vom *virtual environment control*, der mittels komplexer Algorithmen wie beispielsweise geometrischer Transformationen verarbeitet wird. Gleichzeitig speist die Systemsteuerung fortlaufend das *virtual environment display* mit Daten, was der Adaption und Dynamik der virtuellen Umgebung dient.

Die nachfolgenden Kapitel dienen der Einführung in die Möglichkeiten der technischen Realisation virtueller Szenerien.

2.2.1 Anzeigesysteme (*virtual environment display*)

Wenngleich die Kategorie der Anzeigesysteme alle Ausgabegeräte subsumiert, welche in der Lage sind, die menschlichen Wahrnehmungskanäle anzusprechen und den Nutzer in eine virtuelle Szenerie eintauchen zu lassen, sind jedoch zumeist visuelle Ausgabetechnologien gemeint, die im Vergleich mit anderen Sinnesmodalitäten (haptisch, taktil, auditorisch, olfaktorisch) am besten erforscht sind. Da auch in der vorliegenden Arbeit die Generierung der VR auf visuellen Anzeigesystemen beruht, beschränkt sich die Darstellung auf Visualisierungstechnologien.

Die Parameter der Visualisierungssysteme sind in erster Linie an den sensorischen Eigenschaften des menschlichen visuellen Systems auszurichten, wozu die foveolare Fixation ebenso gehört wie Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung oder die Fixierungsreflexe (vgl. Goldstein, 2002). In Abhängigkeit dieser physiologischen Merkmale lassen sich die Projektionssysteme virtueller Realitäten hinsichtlich der Ausprägung in den Bereichen der Stereoskopie (griech.: *stereo* = räumlich – *skopein* = sehen), Augenstabilität, des Gesichtsfeldes (*field of view* - kurz *FoV*) sowie graphischer Eigenschaften wie die Bildwiederholfrequenz, Auflösung, Helligkeit, Farbtreue, Tiefenschärfe etc. charakterisieren und differenzieren (vgl. McKenna & Zeltzer, 1992).

Die spezifische Kombination der einzelnen Parameter bestimmt letztlich den Immersionsgrad der Visualisierungstechnologien, woran zumeist die Qualität des Anzeigesystems bemessen wird (vgl. Slater & Wilbur, 1997). Die Immersion beschreibt, inwieweit es dem System gelingt, die Perzeption des Nutzers auf virtuelle Stimuli auszurichten, indem es die Sinne des Anwenders gewinnt und Distraktoren aus der realen Welt blockiert werden (Biocca, 1992).

In Relation dazu lassen sich die verschiedenen Displaytechnologien in einem ersten Schritt den non-immersiven vs. immersiven VR-Umgebungen zuordnen (vgl. Axelsson, 2002; Hindmarsh, Fraser, Heath & Benford, 2001), wobei sich letztere weiter in voll-immersive und semi-immersive Projektionssysteme differenzieren lassen¹.

¹ Auf eine ausführliche Darstellung der verschiedenen desktopbasierten und immersiven Anzeigesysteme und deren unterschiedlichen Leistungsmerkmale wird an dieser Stelle aus arbeitsökonomischen Gründen verzichtet. Eine detaillierte Klassifikation findet der Rezipient beispielsweise bei Biocca & Delaney (1995).

Der Terminus non-immersiv ist für die desktopbasierten virtuellen Umgebungen reserviert. Dazu zählen die auf konventionellen Technologien basierenden Personalcomputer, Laptops oder Beamer, deren Darstellungsmöglichkeiten auf eine reine 2-D-Visualisierung (monoskopische Raumwahrnehmung) limitiert sind. Damit können maximal minimal-immersive Effekte hervorgerufen werden, da die Anwender nicht - wie bei immersiven Displaysystemen - von der visualisierten Datenwelt umgeben sind. Ungeachtet dessen sind die Anwendungsbereiche desktopbasierter VR-Umgebungen vielfältig, wobei besonders interessant ist, dass sie in den letzten Jahren auch vermehrt im Rahmen des computergestützten Lernens eingesetzt werden (Moreno, Mayer, Spires & Lester, 2001; Müller & Hufnagel, 2002).

Auf Seiten der immersiven Projektionssysteme finden sich unterschiedliche technische Zugänge, die zur Repräsentation dreidimensionaler Informationen genutzt werden, was in erster Linie die Variation der Systeme hinsichtlich der Immersion erklärt. Die vorab dargestellte Klassifikation aufgreifend, wird von voll-immersiven Systemen immer dann gesprochen, wenn die Visualisierung das gesamte Gesichtsfeld abdeckt, wohingegen bei semi-immersiven Systemen das *field of view* einen geringeren Umfang aufweist. Zu den derzeit bekanntesten voll-immersiven Anzeigesystemen gehören die kopfbasierten *Head Mounted Displays (HMD)* und die Mehr-Wand-Projektionssysteme (*Cave Automatic Virtual Environment* - kurz *Cave*).

Beim HMD erfolgt die Informationsausgabe über die in Abbildung 1 dargestellten Datenbrillen. In die Datenbrille sind zwei kleine Bildschirme integriert, welche einen Teil des Sichtfeldes des Anwenders ausfüllen, wobei der Rest durch die Abdeckungen des Datenhelmes verdunkelt wird (vgl. Buxton & Fitzmaurice, 1998; Johnson, Roussos, Leigh, Vasilakis, Barnes & Moher, 1998; Sutherland, 1968).

Bei der *Cave* befindet sich der Nutzer in einem begehbaren Raum, der die Form eines Würfels aufweist, wobei die Wände aus vier bis sechs halbtransparenten Leinwänden bestehen. Mittels Großraumprojektoren und Spiegeln werden die visuellen Informationen perspektivisch zeitversetzt auf die Leinwände rückprojiziert (vgl. Abb. 1). Der Benutzer kann diese über Shutterbrillen als dreidimensionale Szene wahrnehmen (Cruz-Neira, Sandin, DeFantin, Kenyon & Hart, 1992).

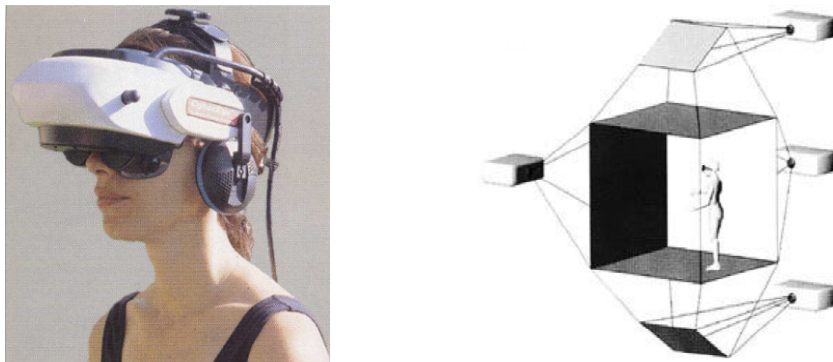


Abb. 1: Voll-immersive Anzeigesysteme. Links: Anwendung des *Head Mounted Display* (aus: Buxton & Fitzmaurice, 1998, p. 75). Rechts: Skizzierte Darstellung der *Cave Automatic Virtual Environment* (aus: Cruz-Neira et al., 1992).

Dem *HMD* und der *Cave* gemeinsam ist die stereoskopisch einheitliche 3D-Darstellung, wohingegen der wesentliche Unterschied darin liegt, dass beim *HMD* die Bilder aktiv erzeugt werden, während die Shutterbrille in der *Cave* eine passive Funktion erfüllt, indem sie zur Fusion der projizierten Bilder im visuellen System des Menschen beiträgt (vgl. auch Hodges, 1992 zur Shutter-Technik).

Auf Seiten der semi-immersiven Projektionssysteme zählen die Powerwall und Stereoprojektionsleinwände zu den am weitesten verbreiteten Vertretern dreidimensionaler Visualisierung.

Die Stereoprojektionsleinwände arbeiten mit linearen Polarisationsverfahren. Dabei übertragen zwei Projektoren die visuellen Informationen gleichzeitig auf eine Rückprojektionsleinwand, welche sich

zwischen dem Betrachter und den Beamern befindet. Damit aus den hochfrequenten und unterschiedlich polarisierten Reizen im visuellen Kortex ein dreidimensionales Bild entsteht, trägt der Anwender eine Polarisationsbrille, welche für jeweils ein Auge das waagrecht und senkrecht polarisierte Licht selektiert.

Auch bei der Powerwall werden zur Visualisierung der großen Datenmengen mehrere Projektoren eingesetzt. Im Unterschied zur Stereoprojektionsleinwand werden die Informationen jedoch abwechselnd auf eine großflächige Leinwand projiziert. Der stereoskopische Eindruck beim Anwender wird - wie bei der *Cave* - durch das Tragen einer Shutterbrille erzeugt. Wenngleich die Anzahl der eingesetzten Projektoren von Anwendung zu Anwendung variiert, werden zumeist mindestens vier Beamer zur Visualisierung genutzt.

In der vorliegenden Untersuchung werden drei Visualisierungssysteme zur Darstellung der virtuellen Umgebung eingesetzt:

- 1) desktopbasiertes Projektionssystem
- 2) Großprojektionssystem
- 3) stereoskopische Powerwallprojektion.

2.2.2 Interaktionssysteme (*real environment sensing*)

Wie einleitend dargestellt entsteht eine virtuelle Umgebung aus dem Zusammenspiel von Anzeigesystem, Systemsteuerung sowie der Möglichkeit mit der virtuellen Szenerie zu interagieren. Das Interaktionssystem beschreibt dabei den Weg der Benutzung eines physischen Eingabegerätes, um im Mensch-Maschine-Dialog eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen (Jacob, 1990). Zu den bekanntesten Interaktionsmetaphern gehören die *Tracking*-Verfahren, welche in erster Linie der Positions- und Orientierungsbestimmung dienen sowie die Instrumente zur manuellen Interaktion in virtuellen Umgebungen.

Tracking

Der Terminus *Tracking* (engl.: *to track* = verfolgen) bezeichnet ein Verfahren, das es ermöglicht, die virtuelle Umgebung mit verschiedenen Informationen zu versorgen, wozu die physikalische Position des Anwenders ebenso gehört, wie die Ausrichtung des Gesichtsfeldes oder spezifischer Körperteile. Im Laufe der Zeit wurden unterschiedliche Methoden des *Trackings* entwickelt. Dazu zählen neben elektromagnetischen Verfahren, mechanische *Tracking*-Systeme oder akustische *Tracker* bei denen die Lokalisation via Schallsignallaufzeiten zwischen einem mobilen Sender und mehreren fixen Empfängern erfolgt. Die bislang präziseste Lösung bietet das optische *Tracking*, bei dem die Position und Orientierung mittels Lichtsignalen bestimmt wird. Dazu werden am Nutzer Emitter befestigt, welche Lichtsignale senden, die von fix installierten Kameras empfangen werden, wobei das Verfahren an die Sichtverbindung zwischen Kameras und Emitter gebunden ist (vgl. Rolland, Baillot & Goon, 2001 für eine Übersicht zu *Tracking*-Systemen).

Manipulation

Zu den populärsten Bedienelementen gehören die handelsübliche Mouse und Tastatur (Geiser, 1990), die zumeist als Schnittstelle für desktop-basierte VR-Umgebungen eingesetzt werden, jedoch auch vermehrt in immersiven virtuellen Szenarien Anwendung finden. Der wesentliche Nachteil der

traditionellen Technologien besteht darin, dass die Navigation und Manipulation auf den zweidimensionalen Raum beschränkt ist. Eine natürliche und intuitive Interaktion in der VR erfordert jedoch dreidimensionale Eingabegeräte, die nicht nur zwei, sondern sechs Freiheitsgrade (engl.: *degrees of freedom*, kurz: *dof*) hinsichtlich der Translation und Rotation im Raum unterstützen (vgl. Henning, 1997). Dazu gehören die in Abbildung 2 visualisierten Translationen auf der x-, y-, und z-Achse sowie die Rotationsbewegung *roll* (engl.: *roll* = drehen), *pitch* (engl.: *pitch* = neigen) und *yaw* (engl.: *yaw* = wenden).

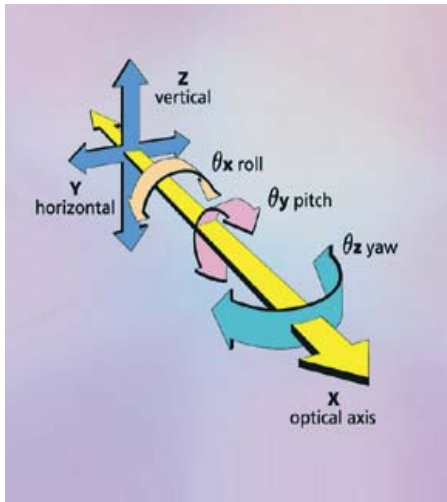


Abb. 2: Darstellung der sechs *degrees of freedom* im dreidimensionalen Raum.

Die dargestellten Einschränkungen führten dazu, dass die herkömmliche Mouse in verschiedene Richtungen modifiziert (vgl. Zhai, 1998) und weiterentwickelt wurde. Im Ergebnis stehen heute mit der RingMouse (Amemiya, Ando & Maeda, 2005), dem Spaceball (Gooch, 1995), der Spacemouse (vgl. Hirzinger & Gombert, 1993) der 2D/6D-Maus (Logitech Inc., 1991) oder Cubic Mouse (Fröhlich & Plate, 2000, vgl. Abb. 3) interessante Alternativen zur Verfügung, die eine Interaktion im dreidimensionalen Raum unterstützen.

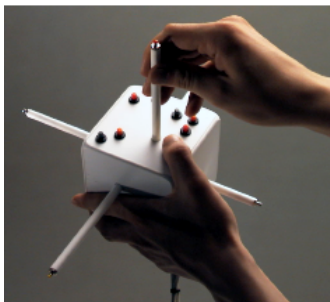


Abb. 3: Die Cubic Mouse als Beispiel für intuitive Interaktionsmetaphern in dreidimensionalen Räumen (aus: Fröhlich & Plate, 2000).

Eine weitere Kategorie von Eingabegeräten bilden die handelsüblichen Gamecontroller, welche Joysticks, Gamepads, Lenkräder etc. subsumieren, die insbesondere aufgrund ihrer Verbreitung durch die Computerspieleindustrie für Anwendungen im Bereich virtueller Realitäten von großer Bedeutung sind. Zusätzlich bieten die Controller zumeist den Vorteil, dass sie eine programmierbare Tastenbelegung erlauben, die an der spezifischen Applikation ausgerichtet werden kann, was eine intuitive Navigation und Interaktion in verschiedenen VR-Szenarien ermöglicht. Darüber hinaus sind die modernen Controller heute überwiegend als *wireless* (engl.: *wireless* = kabellos) Variante verfügbar, was sie für den Einsatz in Forschung und Entwicklung noch interessanter macht.

Die Anzahl der auf dem Markt befindlichen Gamecontroller ist kaum mehr überschaubar. Zu den derzeit bekanntesten Vertretern zählen sicherlich das Rumblepad (<http://www.logitech.com>) und die Wii-Remote mit der Nunchuk-Erweiterung (<http://www.nintendo.de>).

Den bislang vorgestellten Interaktionsgeräten steht jedoch zumeist der Einwand gegenüber, dass sie einzig der Ausgabe von Signalen dienen. Damit nutzen sie die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine effektiv nur in eine Richtung, wonach sie häufig auch als passive Interaktionsmetaphern bezeichnet werden. Ein weiterer Kritikpunkt resultiert aus dem evolutionären Blickwinkel, denn anatomisch betrachtet, ist die Hand in erster Linie als Greifwerkzeug konzipiert und nicht auf eine Interaktion mit Mouse, Tastatur etc. ausgerichtet. Diese Kritikpunkte wurden in der jüngeren Vergangenheit aufgegriffen, was neuartige Interaktionsmetaphern wie beispielsweise den *data glove* (engl.: *data glove* = Datenhandschuh) oder *data suit* (engl.: *data suit* = Datenanzug) sowie die *force feedback* (engl.: *force feedback* = Kräfte Rückmeldung) und *touch feedback* (engl.: *touch feedback* = taktile Rückmeldung) Technologien hervorbrachte.

Der in Abbildung 4 dargestellte *data glove* dient der Erfassung und Umsetzung von Handbewegungen und -gesten im virtuellen Raum. Dazu ist der Handschuh über alle Gelenke der Hand mit Glasfaserkabeln überzogen, die mit Sensoren ausgestattet sind, welche die Differenz der Lichtenergie erfasst, die durch Ausrichtung der Finger und Hand resultieren (Bormann, 1994). Zusätzlich verfügen die Datenhandschuhe zumeist über ein *Tracking-System*, um die relative Position der Hand im Raum zu ermitteln. Der erste Vertreter dieser Handschuhe war der gleichnamige ‚DataGlove‘ des Unternehmens „Visual Programming Language“ (VPL), das Jaron Lanier gründete (vgl. Kap. 2.1). Heute ist eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle erhältlich, die sich hinsichtlich ihrer Freiheitsgrade unterscheiden.

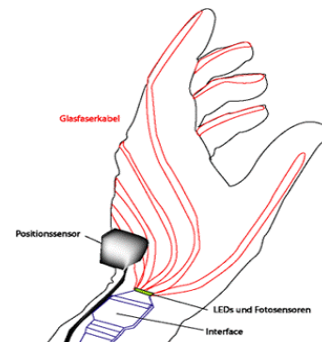


Abb. 4: Links: Beispiel für einen Datenhandschuh. Rechts: Technischer Aufbau des Datenhandschuhs (aus Schnurr, 2003).

Der *data suit* (vgl. Abb. 5) ist ebenfalls eine Entwicklung des Unternehmens VPL. Das Prinzip der Bewegungsdetektion erfolgt wie bei den Datenhandschuhen über Fiberoptikleiter, die jedoch hier - über die oberen Extremitäten hinaus - auf wichtige Teile des gesamten Körpers ausgeweitet sind.



Abb. 5: Datenanzug der Firma VPL (aus: Pape, 1999).

Der Schritt von passiven zu aktiven Eingabetechnologien wurde mit der Entwicklung haptischer Interaktionsgeräte vollzogen, welche sich - wie vorab dargestellt - in *force feedback* und *touch feedback* Systeme differenzieren lassen, die jedoch auch kombiniert werden können.

Die mit *force feedback* ausgestatteten Bedienelemente liegen in tragbarer (vgl. Burdea, Langrana, Roskos, Silver & Zhuang, 1992; Sturman & Zeltzer, 1994) und nicht-tragbarer Form (Hirzinger, Albuschäffer, Hähnle, Schaefer & Sporer, 2001) vor, wobei die Reflexion der Kraft entweder auf elektrischer, hydraulischer oder pneumatischer Basis umgesetzt wird. Ein Beispiel für die Umsetzung der *force feedback* Technologie ist das Exoskelett, was einer Erweiterung des passiven Datenhandschuhs entspricht (vgl. Abb. 6).



Abb. 6: Der CyberGrasp als Beispiel für ein Exoskelett (aus: Virtex, 1998).

Auch die *touch feedback* Interaktionsmetaphern erlauben neben der Informationseingabe eine Stimulation der Rezeptoren der Haut (Iwata, 2003), wobei diese kutane (lat.: *cutis* = Haut) Parameter wie Temperatur, Vibration oder Druck übertragen. Wie die Abbildung 7 zeigt, lässt sich dabei die Stimulation der Rezeptoren pneumatisch, vibrotaktile, elektrotaktile oder thermoelektrisch umsetzen (Burdea, 1996).

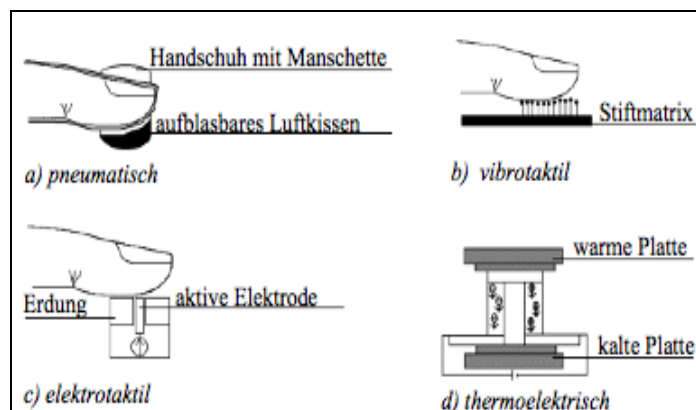


Abb. 7: Möglichkeiten der Umsetzung von *touch feedback*. (aus: Burdea, 1996).

Grundsätzlich gilt, dass Interaktionstechniken, die mit der Möglichkeit des *force feedback* und/oder *touch feedback* ausgestattet sind und folglich eine Kommunikation von Mensch und Maschine in zwei Richtungen erlauben, der Gruppe aktiver Interaktionsmetaphern zuzurechnen sind.

In der vorliegenden Untersuchung werden zwei Interaktionsgeräte aus dem Bereich der Gamecontroller eingesetzt:

- 1) Cordless Logitech Rumblepad 2
- 2) Nintendo Wii-Remote mit Nunchuk².

² Unter Berücksichtigung der Lesbarkeit der Arbeit wird das Interaktionsgerät Wii-Remote mit Nunchuk im weiteren Verlauf der Arbeit verkürzt als Wii-Remote bezeichnet, was jeweils die Nunchuk-Erweiterung einschließt.

2.2.3 Steuerungs- und Kontrollsysteme (*virtual environment control*)

Um die riesigen Datenmengen zu verarbeiten, die zur Generierung der künstlichen Umgebungen notwendig sind, bedarf es einer hochleistungsfähigen Computertechnologie und spezieller Softwarelösungen. Die dabei eingesetzten Steuerrechner werden traditionell in Workstation und Personalcomputer unterteilt.

Während der Personalcomputer zumeist für die Einzelbenutzung ausgelegt ist und vorrangig im Büroalltag oder im privaten Bereich Anwendung findet, können die auf UNIX basierenden Workstations als Ein- oder Mehrbenutzersysteme fungieren. Aufgrund ihrer Hardware sind sie besonders leistungsfähig und erbringen im Bereich graphischer Darstellung und Speicherkapazität Ergebnisse, die anfänglich weit über denen herkömmlicher Personalcomputer lagen. Der rasanten Weiterentwicklung im Bereich der Personalcomputer (Prozessorgeschwindigkeit, Grafikkarten etc.) ist es jedoch geschuldet, dass die Grenzen mehr und mehr verschwimmen und bereits heute Personalcomputer Leistungsbereiche abdecken, die noch vor wenigen Jahren den Workstations vorbehalten waren.

Demnach ist es heute nicht mehr notwendig, per se auf Workstations zurückzugreifen, um komplexe Datenmengen abzubilden.

2.3 Wahrnehmung in Virtueller Realität

Der Definition von Goldstein (2002) folgend, kann Wahrnehmung als die Summe von Aufnahme, Auswahl, Verarbeitung sowie Interpretation sensorischer Informationen verstanden werden, wobei nur diejenigen Informationen verarbeitet werden, welche der Adaption des Wahrnehmenden an die Umwelt dienen. Bereits an dieser Stelle wird transparent, dass Wahrnehmung ein aktiver Prozess ist, der über die Konstruktion des Abbildes der Umwelt hinaus auch der Orientierung und Anpassung an die Umweltbedingungen sowie der Steuerung des Verhaltens dient. Forscher unterschiedlicher Richtungen nähern sich dem Phänomen Wahrnehmung mit verschiedenen Untersuchungsansätzen, welche beispielsweise in den Bereichen der Sinnes- und Wahrnehmungsphysiologie, der Psychophysik oder Gestaltpsychologie verortet sind. In der vorliegenden Arbeit wird ein kognitiv-behavioraler Zugang zur Untersuchung der Wahrnehmung gewählt, welcher auf der Theorie von Malim (1994) fußt, wonach die Perzeption (engl.: *perception* = Wahrnehmung) chronologisch in vier aufeinander folgenden Schritten erfolgt. In einem ersten Schritt wird der auslösende Stimulus über die peripheren Rezeptoren erfasst und zu Empfindungen verarbeitet. Daran anschließend wird das Perzept weiterverarbeitet, was an einen Abgleich der Informationen aus der Umwelt, mit dem Vorwissen des Wahrnehmenden und dem Kontext der Reizinformation gekoppelt ist. Durch diese *top-down* Prozesse (engl.: *top-down* = von oben nach unten) wird dem Individuum die Sinneswahrnehmung bewusst (vgl. Sternberg, 2005 zu *top-down* Prozessen in der kognitiven Psychologie). Abschließend wird das Ergebnis des Abgleichs interpretiert, womit es zugleich eine subjektive Bedeutung erhält, was entscheidend für die jeweilige Reaktion des Individuums ist, die als Resultat des Wahrnehmungsvorganges gilt³.

Während Stimulus und Reaktion den manifesten Variablen zuzurechnen sind, verschließen sich die internal ablaufenden Prozesse der Wahrnehmung einer direkten Beobachtung. Um dennoch konfi-

³ Der wahrnehmungstheoretische Ansatz von Malim (1994) ist abstrahiert dargestellt. Einen detaillierten Einblick in die Theorie findet der Rezipient bei Jenewein & Hundt (2009).

dente Aussagen hinsichtlich der Gestaltung, Entwicklung und Optimierung von Mensch-System-Schnittstellen im Rahmen virtueller Umgebungen treffen zu können, ist es erforderlich, sich derjenigen psychologischen Konstrukte zu bedienen, die als Korrelate der Wahrnehmung im Bereich virtueller Realität gelten.

Die nachfolgenden Abschnitte führen diejenigen psychologischen Konstrukte ein, welche im Zusammenhang mit Wahrnehmung in VR stehen. Anschließend werden die Möglichkeiten der Erhebung der einzelnen Konstrukte unter dem Blickwinkel der vorliegenden Arbeit diskutiert.

2.3.1 Sense of presence - Präsenzerleben

Im Zusammenhang mit Wahrnehmung und Lernen in virtuellen Realitäten wird dem *sense of presence* (engl.: *sense of presence* = Präsenzerleben) eine zentrale Stellung eingeräumt. Für das Erleben von Präsenz in virtuellen Umgebungen gibt es verschiedene Definitionsversuche, jedoch fehlt bislang - in Ermangelung einer adäquaten Theorie für die Erklärung des Phänomens - ein einheitlicher Konsens. Begrifflich kann Präsenz als die „[...] subjektive Erfahrung an einem Ort oder in einer Umgebung zu sein, selbst wenn man sich körperlich anderswo befindet.“ fixiert werden (Witmer & Singer, 1998). Dieses auch als *being there* (engl.: *to be there* = da sein, vgl. Reeves, 1991) beschriebene Erleben in einer medienvermittelten Umgebung zeichnet sich dadurch aus, dass das Medium für den Nutzer subjektiv verschwindet und die Interaktion nicht mehr als vermittelt, sondern unmittelbar wahrgenommen wird (Lombard & Ditton, 1997; Slater & Wilbur, 1997).

Das Modell von Steuer (1992) stellt mit der Immersion des Mediums und der Individualität des Individuums zwei mediale Prädiktoren heraus, die das Erleben von Präsenz entscheidend bestimmen. Wie bereits in Kap. 2.2.1 dargestellt, ist die Immersion an technische Parameter gebunden (vgl. auch Slater, Usoh & Steed, 1995; Slater & Wilbur, 1997). Demnach ist das Präsenzerleben sowohl von der Lebendigkeit des Mediums, welche von der sensorischen Breite und Tiefe (engl.: *vividness*) erzeugt wird (Bildwiederholungsfrequenz, Intensität der angesprochenen sensorischen Modalitäten etc.) als auch vom Grad der Interaktivität abhängig, was die Geschwindigkeit der Interaktion, Handlungsbreite und die Anpassungsmöglichkeiten der Steuerungselemente einschließt (Steuer, 1992; vgl. auch Barfield & Weghorst, 1993 für eine Übersicht zu technischen Determinanten und Präsenzerleben).

In empirischen Studien konnte gezeigt werden, dass höhere Bildwiederholungsfrequenzen ebenso mit einem verbesserten Präsenzerleben einhergehen (Barfield & Hendrix, 1995) wie eine realistischere Darstellung und ein höheres Ausmaß an Interaktivität (Welch, Blackmon, Liu, Mellers & Stark, 1996) oder eine höherwertige Bildqualität des Projektionssystems (Barfield & Weghorst, 1993). Mit Blick auf die Argumentation von Steuer (1992) ist neben technischen Merkmalen, dem Individuum eine wichtige Rolle hinsichtlich des *sense of presence* einzuräumen. Zu den potentiellen Determinanten auf Seiten des Subjektes zählen insbesondere die Präsenzbereitschaft, das Geschlecht sowie die individuelle Computererfahrung und die Erfahrung mit Computer- und Konsolenspielen.

Die Präsenzbereitschaft verdeutlicht, dass das Erleben der illusionären Unmittelbarkeit nicht zuletzt von der grundlegenden Offenheit und Bereitschaft des Nutzers abhängt, das Wissen um die künstlich geschaffene Umgebung aufzugeben und in die VR einzutauchen (Heeter, 1992; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Laurel, 1993). Die Ausprägung der Präsenzbereitschaft variiert zum einen in Abhängigkeit der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen und zum anderen der Bereitschaft des Individuums, sich beispielsweise beim Lesen oder Fernsehen – unter Ausblendung von Distraktoren und der Perspektivübernahme von Charakteren – generell auf andere Umgebungen einlassen zu können (Held & Durlach, 1992; Lombard & Ditton, 1997).

2.3.2 Usability - Gebrauchstauglichkeit

Ein weiteres Schlüsselkonstrukt im Forschungskontext der Mensch-Maschine-Interaktion bildet die *usability* (engl.: *usability* = Gebrauchstauglichkeit), wobei es für die begriffliche Fixierung des Konstruktes - vergleichbar mit dem *sense of presence* - eine Vielzahl von Ansätzen gibt (Preece, Rogers, Sharp, Benyon, Holland & Carrey, 1994). Eine der gebräuchlichsten Definitionen findet sich in der DIN EN ISO 9241, welche als internationaler Standard die Richtlinien der Interaktion zwischen Mensch und Computer beschreibt. *Usability* wird hier als das Ausmaß definiert, „[...] in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und mit Zufriedenheit zu erreichen.“ (DIN EN ISO 9241-11, 1996, S. 2). Demnach beschreibt die Gebrauchstauglichkeit, „[...] wie adäquat ein Produkt in der Handhabung zu den Bedürfnissen, Fähig- und Fertigkeiten sowie Wünschen seiner Nutzer passt.“ (Niegemann, 2008, S. 421), bemessen an den Attributen Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. Effektivität bezeichnet dabei die Möglichkeiten des Users, seine Arbeitsziele in Abhängigkeit der Gestaltungsaspekte des Lernangebotes eines Produktes sowohl präzise als auch vollständig zu erreichen, während Effizienz die Relation von Aufwand zur erbrachten Leistung bestimmt. Hinter dem Kriterium der Zufriedenheit verbirgt sich die Frage, ob und inwieweit die Erwartungen an ein multimediales Lernangebot erfüllt und Arbeitsprozesse frei von Beeinträchtigung ausgeführt werden können, was als Voraussetzung für eine positive Einstellung des Users gegenüber dem Produkt gilt. Die Zufriedenheit als drittes Attribut der *usability* ist somit ein wesentlicher Aspekt der Akzeptanz eines multimedialen Lernangebotes und wirkt sich sowohl auf die Effektivität als auch Effizienz aus.

2.3.3 Simulator sickness

Das erstmals von Havron und Butler (1957) im Kontext einer Hubschraubersimulation dokumentierte Phänomen der *simulator sickness* (engl.: *simulator sickness* = Simulatorkrankheit) zählt zu den unerwünschten Nebenwirkungen, die bei der Nutzung virtueller Umgebungen auftreten können. Diese besondere Form der Kinetosen häufig synonym auch als *Cybersickness* bezeichnet (vgl. Stanney, Kennedy & Drexler, 1997 zur Kontroverse *simulator sickness* vs. *Cybersickness*), geht mit einer Vielzahl visueller und vestibulärer Störungen einher, die in ihrer Kombination den für die Simulatorkrankheit typischen polysymptomatischen Komplex bilden (Biocca, 1992). Zu den potentiellen Begleiterscheinungen gehören beispielsweise allgemeines Unwohlsein, Schwitzen, Apathie, Müdigkeit, Schwindelgefühl, Brechreiz sowie Erbrechen, wobei die physiologischen Reaktionen hinsichtlich quantitativer und qualitativer Aspekte (Anzahl, Schweregrad, zeitlicher Verlauf) beträchtlichen interindividuellen Differenzen unterliegen (vgl. Kolasinski, 1995; Watson, 2000). Zu den weiteren individuellen, aufgabenbezogenen und simulatorabhängigen Einflussfaktoren, welche das Erleben von *simulator sickness* moderieren, zählen Alter, Geschlecht, Erfahrung mit VR, Merkmale der Visualisierung, Dauer der Simulation etc. (vgl. Kolasinski, 1995, 1996 für eine ausführliche Darstellung).

Hinsichtlich der Pathogenese der *simulator sickness* wurden unterschiedliche theoretische Ansätze publiziert. Neben der Gifttheorie, die eine evolutionäre Erklärung anbietet (Treisman, 1977), zählen das Modell der Haltungsinstabilität, welche den Verlust der Haltungskontrolle als Ursache der Symptomatik annimmt (Riccio & Stoffregen, 1991) und die *sensory-conflict*-Theorie (Bles, Bos & Kruit, 2000; Reason & Brand, 1975) zu den am weitesten verbreiteten und einflussreichsten Erklärungsansätzen. Letztgenannte fußt im Kern auf den Grundlagen der menschlichen Orientierung im dreidimensionalen Raum, die durch ein komplexes Zusammenspiel des visuellen, vestibulären und kinästetischen System vermittelt wird, das auf dem Prinzip der Synchronität beruht (vgl. Bischof, 1966).

Kommt es zu einem *mismatch* (engl.: *mismatch* = Diskrepanz) zwischen den sensorischen Inputs der verschiedenen Sinnesmodalitäten, resultiert daraus ein Konfliktsignal, das in der Folge die Symptomatik der *simulator sickness* evozieren kann (DiZio & Lackner, 1992).

Ähnlich wie in Flug- und Fahrzeugsimulatoren finden sich in virtuellen Umgebungen verschiedene Möglichkeiten, die Wahrnehmungskonflikte der verschiedenen Sinneskanäle hervorrufen können. Ein *mismatch* kann beispielsweise entstehen, wenn das visuelle System bei einer Simulation via *HMD* durch aktive oder passive Bewegungen stimuliert wird, wohingegen eine durch das Vestibulärorgan vermittelte Propriozeption (lat.: *proprius* = eigen; *recipere* = aufnehmen) der eigenen Bewegung fehlt. Obwohl die *sensory-conflict*-Theorie ebenso wenig wie die alternierenden Erklärungsansätze in der Lage ist, die Auftretenswahrscheinlichkeit von *simulator sickness* vorherzusagen, kann sie die interindividuelle Variabilität im Erleben der Simulatorekrankheit hinreichend erklären (Kolanski, 1995).

Ungeachtet der bislang nicht abschließend geklärten Pathogenese der *simulator sickness*, findet sich eine Reihe von Hinweisen darauf, dass die gesundheitlichen und funktionalen Beeinträchtigungen der Betroffenen adaptive Reaktionen hervorrufen, die sich beispielsweise in einem reduzierten Präsenzerleben (Kolasinski, 1995; Stanney, Salvendy, Deisinger, DiZio, Ellis, Ellison, Fogleman, Gallimore, Singer, Hettinger, Kennedy, Lackner, Lawson, Maida, Mead, Mon-Williams, Newman, Piantanida, Reeves, Riedel, Stoffregen, Wann, Welch, Wilson & Witmer, 1998) oder eingeschränktem Lernerfolg (Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal, 1993) widerspiegeln. Darüber hinaus sind die Symptome der *simulator sickness* stärker in immersiven VR-Umgebungen ausgeprägt (Cobb, Nichols, Ramsey & Wilson, 1999; Naepflin & Menozzi, 1998) und die Ergebnisse von Barfield et al. (1993) sprechen dafür, dass bei Frauen im Vergleich mit Männern vermehrt Nebenwirkungen auftreten. Wenngleich die Symptome der Simulatorekrankheit nach Beendigung der VR-Anwendung zumeist rasch abklingen (Cobb et al., 1999), sind negative Effekte virtueller Umgebungen unter ethischen Gesichtspunkten dennoch immer kritisch zu betrachten (Biocca, 1992), wonach eine Erhebung der *simulator sickness* unumgänglich ist.

2.3.4 Messung der Konstrukte

2.3.4.1 *Sense of presence*

Wie in Kapitel 2.1.3 dargestellt, beschreibt das Konstrukt Präsenzerleben die individuelle Empfindung der Nutzer virtueller Umgebungen, die sich sowohl über subjektive als auch objektive Indikatoren erheben lässt (Blascovich, 2002). Zu den objektiven Methoden zählen u. a. die Verhaltensbeobachtung (behavioral), die Erfassung physiologischer Variablen oder die kontinuierliche Rückmeldung der Versuchspersonen (vgl. Schuemie, Straaten, Krijn & Mast, 2001).

Der Einsatz objektiver Erhebungsmethoden ist jedoch immer mit der Einschränkung verbunden, dass die an die Messung gekoppelten Interventionen mit dem Erleben der Anwender selbst konfundiert sind (Psootka, 1995). Um diesen Störfaktor auszuschließen, wird zumeist auf subjektive Messverfahren zurückgegriffen, die auf Selbstauskünften basieren und sowohl in quantitativer (Fragebögen) als auch qualitativer Form (Interviews) vorliegen (vgl. Garau, Friedman, Widenfeld, Antley, Brogni & Slater, 2008; Schuemie et al., 2001; Sheridan, 1992). Im Bereich der Fragebogenerhebung finden sich in der Literatur verschiedene Instrumente, welche sich in erster Linie hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Items unterscheiden (Barfield et al., 1993; Regenbrecht, Schubert & Friedmann, 1998; Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff, 2000; Slater, Usoh & Steed, 1994; vgl. auch Nash, Edwards, Thompson, & Barfield, 2000; Schuemie et al., 2001 für eine Übersicht), wobei zu den bekanntesten und ge-

bräuchlichsten Messinstrumenten der *Presence Questionnaire (PQ)* von Witmer et al. (1998) zählt. Die 19 Items des *PQ* erlauben es dem Nutzer virtueller Umgebungen ihr individuelles Empfinden auf einer siebenstufigen Likert-Skala hinsichtlich der Faktoren Kontrolle, Sensorik, Distraktoren und Realismus einzuschätzen. Der wesentliche Vorteil des *PQ* gegenüber alternativen Fragebögen liegt in den Bemühungen der Autoren, ein aus testtheoretischer Perspektive sowohl reliables als auch valides Messverfahren zu entwickeln und entsprechende Gütekriterien auszuweisen. Während für andere Messinstrumente wenig oder keine Angaben zu den Gütekriterien vorliegen, geben Witmer et al., (1998) die interne Konsistenz des *PQ* mit Cronbachs $\alpha = .88$ (vgl. Cronbach, 1951) an und verweisen gleichzeitig auf erste aussichtsreiche Studien zur Konstruktvalidität.

2.3.4.2 Präsenzbereitschaft

Im Kapitel 2.3.1 wurde ebenfalls erläutert, dass das Erleben von Präsenz insbesondere die Bereitschaft des Nutzers voraussetzt, sich auf die virtuell vermittelte Umgebung einzulassen, was unter dem Begriff der Präsenzbereitschaft oder subjektiver Immersion (Slater, 1999) zusammengefasst wird. Analog zum *PQ* bieten Witmer et al. (1998) mit dem *Immersive Tendency Questionnaire (ITQ)* ein Fragebogenverfahren zur Erfassung der Präsenzbereitschaft an. Das Pendant zum *PQ* misst mit 18 Items die Prädisposition von Anwendern, sich in der VR immersiv zu verhalten. Ebenso wie der *PQ* basiert der *ITQ* auf einer siebenstufigen Likert-Skala zur Bewertung der Präsenzbereitschaft hinsichtlich der Kategorien Einbindung, Fokussierung und Spielverhalten. Die interne Konsistenz des *ITQ* geben Witmer et al. (1998) mit $\alpha = .81$ an.

Weiterhin konnten die Autoren eine positive Korrelation von *ITQ* und *PQ* nachweisen ($r = .24$, $p = .01$), was dafür spricht, dass Benutzer virtueller Umgebungen, die eine größere Affinität zur subjektiven Immersion aufweisen, leichter Präsenz erleben als Versuchspersonen mit niedrigen Werten im *ITQ*.

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, gibt es bislang keinen einheitlichen Konsens zur Messung des *sense of presence*, was unter Berücksichtigung des Fehlens einer adäquaten theoretischen Basis für die Erklärung des Phänomens nicht verwundert (vgl. Kap. 2.3.1). Dessen ungeachtet; obwohl sowohl der *PQ* als auch der *ITQ* einer noch umfassenderen Validierung bedürfen, beinhalten die Messverfahren mit Blick auf die Gütekriterien, den testtheoretisch verlässlichsten Itempool zur Erfassung von Präsenzerleben sowie -bereitschaft, wonach sie in der vorliegenden Studie als Messinstrumente Anwendung finden.

2.3.4.3 Usability

Die Evaluation der *usability* ist - nicht nur im Kontext virtueller Umgebungen - Grundvoraussetzung für die Beurteilung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und damit ein wesentlicher Baustein des *Usability-Engineering*-Prozesses (vgl. Hannafin & Peck, 1988). Zur Operationalisierung des zentralen Kriterien-Trias Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit sind unterschiedliche Ansätze entwickelt worden, wobei sich die Wahl der Methode, die entweder in Form von Beobachtung oder Befragung erfolgt, an der entsprechenden Fragestellung orientiert.

Bevan, Kirakowski & Maissel (1991) differenzieren mit dem produktzentrierten, formal-analytischen, benutzerzentrierten sowie interaktionszentrierten Messansatz vier Strategien zur Erhebung der *usability*, die sowohl separat als auch kombiniert angewendet werden können (Niegemann, 2008).

Der produktzentrierte Messansatz fokussiert in erster Linie ergonomische Aspekte der Gebrauchstauglichkeit, die zumeist von Experten unter Einsatz verschiedener Inspektionsmethoden beurteilt werden. Dazu zählen verschiedene Heuristiken wie der *cognitive walkthrough* (Lewis & Wharton, 1997) oder die heuristische Evaluation (Nielsen, 1993, vgl. auch Molich & Nielsen, 1990 für einen Überblick zu Heuristiken) sowie Checklisten und Fragebögen wie der EVADIS II (Oppermann, Murchner, Reiterer & Koch, 1992), *Purdue Usability Testing Questionnaire* (Lin, Choong & Salvendy, 1997) oder *Keevil Usability Index* (Keevil, 1998). Neben diesen Messinstrumenten, welche alle Facetten der *usability* berücksichtigen, fokussieren andere Fragebögen einzelne Aspekte der Gebrauchstauglichkeit, wie der *Questionnaire for User Interface Satisfaction* - kurz *QUIS* (Shneiderman, 1987), der explizit die Zufriedenheit des Anwenders mit der Systemschnittstelle in den Mittelpunkt stellt.

Der formal-analytische Messansatz basiert wie der produktzentrierte Zugang vorrangig auf Expertenurteilen, wobei hier die Eigenschaften des Users und die Attribute des multimedialen Lernangebotes in Relation zur Performanz und psychomentaler Leistung betrachtet werden. Dazu werden Handlungen protokolliert und später analysiert, was beispielsweise auf Basis des *Keystroke-Level-Modell* (Card, Moran & Newell, 1990) oder der *Cognitive Complexity Theorie* (Kieras & Polson, 1985) umgesetzt wird.

Demgegenüber wird die Gebrauchstauglichkeit beim interaktionszentrierten Verfahren durch Aufzeichnung verschiedener Leistungsmaße erhoben, die aus der Interaktion von Mensch und Maschine hervorgehen. Diese können über Beobachtungsprotokolle (vgl. Müller-Holz, Aschersleben, Hacker & Bartsch, 1991), Eye-Tracking (vgl. Galley, 2001) oder Logfile-Analysen (vgl. Crellin, Horn & Preece, 1990) gemessen werden.

In Abgrenzung zu den bereits vorgestellten Herangehensweisen basiert der benutzerzentrierte Messansatz, der auch als *Usability-Test* in der Literatur beschrieben wird (Rubin, 1994), auf der subjektiven Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit durch die Nutzer. Auch für diesen Zugang liegt eine Vielzahl von Messinstrumenten vor, wie die *Thinking-Aloud-Methode* (Lewis, 1982), die Videokonfrontationsmethode (Neal & Simons, 1984), das *Focus-Group-Verfahren* oder die Checkliste *AttrakDiff* (Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2003).

Darüber hinaus findet sich eine Vielzahl von Fragebogenverfahren, die jedoch zumeist nicht standardisiert sind. Ausnahmen bilden das *Website Analysis and Measurement Inventory* (Kirakowski, Claridge & Whitehand, 1998), das *Software Usability Measurement Inventory* - kurz *SUMI* (Kirakowski & Cierlik, 1993) und die *ISONORM 9241/10* (Prümper & Anft, 1993), die in strukturierter Form vorliegen und Verallgemeinerungen der Ergebnisse erlauben.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt primär auf der Einschätzung der *usability* durch die Anwender, was den Zugang über die benutzerzentrierte Perspektive impliziert. Innerhalb dieses Messansatzes wurde - unter Berücksichtigung der Fragestellungen - mit dem *SUMI* auf ein standardisiertes Messverfahren zurückgegriffen, das häufig eingesetzt wird, um die Qualität von Hard- und Software hinsichtlich der Anwendung aus Sicht des Users zu bewerten. Der *SUMI* orientiert sich an der *ISO-NORM 9241*, wobei er die Gebrauchstauglichkeit mit insgesamt 50 Items auf fünf Skalen (Affekt, Effizienz, Kontrolle, Erlernbarkeit, Nützlichkeit) erfasst (Kirakowski & Cierlik, 1993; vgl. auch Porteous, Kirakowski & Corbett, 1993). Ergänzt wird der *SUMI* durch den *QUIS*, der zwar als Instrument des produktzentrierten Messansatzes konzipiert ist, dessen Items sich jedoch gleichermaßen für ein Rating der Zufriedenheit durch den Endnutzer virtueller Umgebungen eignen. Neben den Selbstauskünften werden auch die Leistungen der Probanden erfasst, die als *logfiles* über die gesamte Dauer der Erhebung protokolliert werden. Diese Vorgehensweise entspricht der Kombination aus benutzer-

und interaktionszentrierten Ansatz, der in der Literatur ausdrücklich empfohlen wird (Niegemann, 2008, S. 430).

Den benutzer- und interaktionszentrierten Messansätzen wird häufig vorgeworfen, im Vergleich zu den Pendanten sehr aufwendig zu sein (vgl. Dumas & Redish, 1993). Diesem Kritikpunkt kann mit Blick auf den formal-analytischen Zugang, der allein auf Effizienz ausgerichtet ist, entgegengehalten werden, dass die überwiegende Anzahl der benutzerzentrierten Messverfahren auf eine ganzheitliche Erfassung der Gebrauchstauglichkeit ausgelegt ist. Darüber hinaus ist es sicher richtig, dass Expertenurteile kostengünstiger sind, dennoch kann die Evaluation multimedialer Angebote auf eine vollständige und umfassende Bewertung durch die Endanwender nicht verzichten, zumal gezeigt werden konnte, dass Experten und Benutzer unterschiedliche Probleme dekuivrieren können (Dumas & Redish, 1999).

2.3.4.4 Simulator sickness

Die Simulatorkrankheit ist, wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt, insbesondere durch variable Symptomcluster gekennzeichnet, wonach eine isolierte Erhebung einzelner Symptome nicht hinreichend ist (Kennedy, Fowlkes, Berbaum & Lilienthal, 1992). Daher werden die potentiellen physiologischen Neben- und Nachwirkungen, welche mit der Nutzung virtueller Realitäten einhergehen, für gewöhnlich über Selbsteinschätzungen in Form von Fragebögen oder Checklisten erhoben.

Zu den weltweit am häufigsten eingesetzten Instrumenten zählt der *Pensacola Motion Sickness Questionnaire (MSQ)* von Kellogg, Kennedy & Graybiel (1965), welcher die Nutzer virtueller Szenerien auffordert, 23 Symptome hinsichtlich der Stärke ihrer Ausprägung zu beurteilen. Ein wesentlicher Nachteil der *MSQ* besteht darin, dass im Ergebnis nur einzelne Symptome zur Interpretation vorliegen, der Fragebogen jedoch keine Aussagen über multiple Dimensionen der *simulator sickness* erlaubt. Dieses Defizit griffen Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal (1993) bei der Entwicklung des *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)* auf. Die Autoren rechneten eine Faktorenanalyse über 1119 Datensätze des *MSQ*, die in 10 verschiedenen Simulatoren erhoben wurden (vgl. Backhaus, Erichson, Plinke & Weiber, 2008, S. 323-388 für eine Einführung in die Faktorenanalyse). Im Ergebnis konnten zum einen die 23 Symptome des *MSQ* auf 16 Symptome reduziert werden, zum anderen sprechen die Berechnungen der FA für eine drei-faktorielle Lösung und damit für drei distinkte Symptomcluster der *simulator sickness*. Die Autoren wählten folgende Bezeichnungen für die Faktoren: 1) *Oculomotor* Cluster (Ermüdung der Augen, Kopfschmerzen etc.); 2) *Nausea* Cluster (Übelkeit, erhöhter Speichelfluss etc.) und 3) *Disorientation* Cluster (unspezifischer Schwindel, Drehschwindel). Neben diesen Clustern kann auch der Gesamtscore des *SSQ* gebildet werden, zu dessen Berechnung alle Symptome berücksichtigt werden (Kennedy et al., 1993, p. 207-208).

Der *SSQ* ist heute das etablierte Verfahren zur Erhebung der *simulator sickness*, wobei Kennedy et al. (1993) explizit darauf hinweisen, dass sich der Fragebogen auch zum Vergleich verschiedener virtueller Umgebungen anbietet, wonach er sich für die vorliegende Studie besonders empfiehlt.

2.4 Zusammenfassung und Fragestellungen

Wie die vorangegangenen Kapitel zeigen, ist bei der wissenschaftlichen Betrachtung der Chancen, die virtuelle Umgebungen eröffnen, eine konzeptionelle Trennung in technologie-basierte Aspekte auf der einen und rezeptionsorientierte Faktoren auf der anderen Seite nicht tragbar (vgl. auch Bente, Krämer & Peters, 2002). Im Gegenteil, wie Bricken & Byrne (1993, p. 200) betonen, ist eine der wich-

tigsten Funktion der VR darin zu sehen, dass die traditionelle Trennung zwischen Mensch und Maschine zugunsten einer direkten und natürlichen Interaktion mit den präsentierten Informationen aufgegeben wird.

Wie einleitend dargestellt, erschließen virtuelle Umgebungen immer neue Anwendungsbereiche. Demgegenüber intensiviert die Wissenschaft erst in den letzten Jahren die Erforschung und Evaluation verschiedener Facetten der VR, was jedoch unverzichtbar ist, um das Potential des neuen Mediums aufzuzeigen. Das Zusammenspiel der zentralen Faktoren, welche die Wahrnehmung in VR determinieren, wurde wiederholt von verschiedenen Autoren diskutiert (vgl. Burdea, 1994; Lavroff, 1992; Robinett, 1992, Wells, 1992, Zeltzer, 1992). Wenngleich die Bezeichnungen der Facetten variieren, sind es jedoch zumeist drei Komponenten, welche in die Diskussion eingebracht werden. In der Konnotation von Burdea (1994) zählen dazu die Immersion, Interaktion und Imagination, wobei sich letztere aus der Integration von Immersion und Interaktion ergibt. Wells (1992) wählt für die inhaltlich nahezu identischen Attribute die Termini Immersion, Interaktion und Intuition. In Übereinstimmung mit Wells (1992) und Burdea (1994) sind mit der Immersion und Interaktion zwei der wichtigsten Determinanten virtueller Systeme charakterisiert, die sich auch zumeist in der Definition Virtueller Realität wieder finden (vgl. Kap. 2.1). Folgerichtig sind es zumeist jene Facetten virtueller Umgebungen, die in Verbindung mit dem *sense of presence* sowie der Performanz im Mittelpunkt empirischer Forschung stehen.

Der Terminus Immersion wurde in Kapitel 2.2.1 als quantitative Beschreibung verschiedener Technologien eingeführt, der durch die spezifischen Parameter der Projektionssysteme wie Stereoskopie, FoV, Auflösung des Displays etc. gekennzeichnet ist. In einer Reihe von Studien wurden einzelne Parameter der Ausgabegeräte wie die Bildwiederholungsrate (Ware & Balakrishnan, 1994; Watson, Spaulding, Walker & Ribarsky, 1997), graphische Auflösung, visuelle Details (Watson, Walker & Hodges, 1995) sowie Latenzzeiten aufgegriffen und einzeln oder kombiniert (Richard, Birebent, Coiffet, Burdea, Gomez & Langrana, 1995) im Zusammenhang mit der Performanz und dem Präsenzerleben (Slater et al., 1994, 1995) in virtuellen Szenarien untersucht. Die Ergebnisse sind uneinheitlich. Einige Studien sprechen dafür, dass Stereoskopie sowohl das Präsenzerleben als auch die damit in Verbindung stehenden Leistungen steigert (Barfield, Hendrix & Bystrom, 1997; Hendrix & Barfield, 1996), während andere darauf verweisen, dass Stereoskopie nur für Bildwiederholraten im niedrigen Bereich leistungsförderlich ist (Richard et al., 1995) oder das Hinzufügen zusätzlicher Hinweise zu einem nichtstereoskopischen Display zu einer vergleichbaren oder sogar besseren Performanz führen kann (vgl. Nemire, 1996).

Ähnlich widersprüchliche Ergebnisse finden sich für den Einsatz virtueller Szenarien im Kontext des Lehrens und Lernens. Eine Vielzahl von Studien spricht dafür, dass das Präsenzerleben positiv mit dem Lernerfolg korreliert (Hoffmann, Prothero, Wells & Groen, 1998; Moreno & Mayer, 2002; Stanley, Kingdon, Graeber & Kennedy, 2002). Die Autoren vermuten, dass das Erleben von Präsenz die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf lernrelevante Stimuli unterstützt, indem kognitive Ressourcen nicht mehr ausschließlich auf das Interface, sondern auf die Inhalte der VR-Umgebung ausgerichtet werden. Für diese Interpretation sprechen auch die Ergebnisse von Darken, Bernatovich, Lawson & Peterson (1999), die zeigen, dass sensorische Information aus der realen Umgebung - die sich während des Aufenthaltes in VR nicht kontrollieren lassen - als Distraktoren wirken. Diese Störeinflüsse reduzieren das Präsenzerleben, indem sie die Aufmerksamkeit auf die Realität ausrichten.

Demgegenüber finden sich Publikationen, die darauf verweisen, dass sich das Erleben von Präsenz auch nachteilig auf den Lernerfolg auswirken kann (Moreno & Mayer, 2000), insbesondere dann, wenn die virtuelle Umgebung Symptome der *simulator sickness* hervorruft (vgl. Kap. 2.3.3). Hinsichtlich der zentralen Frage nach der Bedeutung des Immersionsgrades virtueller Umgebungen auf lernrelevante Fragestellung konnten Moreno & Mayer (2002) zeigen, dass hoch-immersive

levante Fragestellung konnten Moreno & Mayer (2002) zeigen, dass hoch-immersive Umgebungen nicht per se mit besseren Ergebnissen im Bereich des Lernens und Wissenserwerbes einhergehen. Inhaltlich vergleichbare Studien zu traditionellen Medien, welche die Fragestellungen im Kontext computerbasierter Lernumgebungen (de Jong, 1991; Mayer, Mautone & Prothero, 2002; Sweller, 1998), Videos (Cennamo, 1993) und Fernsehsendungen (Salomon, 1991, 1994) untersuchten, zeigen, dass ein getreues Abbild der Realität nicht zwangsläufig auch zu besseren Lernergebnissen führt. Weitere Vorteile der non-immersiven, desktopbasierten Anzeigesysteme liegen zweifellos in den geringeren Anschaffungskosten und der damit verbundenen vereinfachten Zugänglichkeit (Hindmarsh et al., 2001).

Neben dem Zusammenhang von Immersion und *sense of presence* steht mit der *usability* ein weiterer wichtiger Bereich der *human-computer-interaction* (engl.: *human-computer-interaction* - kurz *HCI* = Mensch-Computer-Interaktion) im Fokus des wissenschaftlichen Interesses. Das ist wenig verwunderlich, da es den Entwicklern virtueller Szenarien bislang an Evidenz fehlte, die virtuellen Umgebungen hinsichtlich der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit der Anwender mit dem Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine zu überprüfen. Wichtiges Attribut der *HCI* ist das User-Interface bestehend aus den Eingabe- und Ausgabegeräten (vgl. Hix & Hartson, 1993), welches die Performanz und Akzeptanz der Nutzer (vgl. Hix & Hartson 1993; Shneiderman, 1992) entscheidend mitbestimmt. Folglich wird dem Konzept der *usability*, welches eine große Tradition im Bereich 2D-*HCI* Forschung hat, auch im Bereich der VR-Anwendung eine immer größere Bedeutung beigemessen (vgl. Gabbard & Hix, 1998). In Kapitel 2.3.4.3 wurden verschiedene Zugänge zur Evaluation der *usability* vorgestellt, die auch im Bereich der VR-Anwendung finden. Dazu gehört beispielsweise das Konzept des *cognitive walkthrough* (Steed & Tromp, 1998; Stanney & Reeves, 2000) oder verschiedene Fragebogenverfahren (Darken & Sibert, 1996; Slater et al., 1995; vgl. auch Bowman, Gabbard & Hix, 2002 für einen Überblick der Usability Evaluation in VR). Wie wichtig die Möglichkeit der Interaktion im Bereich der Informationsvermittlung ist, unterstreichen die Ergebnisse von Moreno, Mayer, Spires & Lester (2001), die zeigen, dass VR-Anwender intensiver lernen, wenn sie die Möglichkeit haben mit der virtuellen Umgebung zu interagieren, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Grad an Interaktivität - wie vorab dargestellt - gleichsam eine wichtige Determinante des Präsenzerlebens darstellt.

Zusammenfassend zeigt die Rezeption der Literatur, dass zwar erste empirische Studien zum Zusammenhang von Immersion, *sense of presence*, *usability* und der Performanz in Kontext virtueller Umgebungen publiziert wurden, jedoch bewegt sich die Literatur noch immer in einem recht überschaubaren Rahmen. Darüber hinaus finden sich viele kontroverse Ergebnisse, was weitere Forschungen impliziert, um die Möglichkeiten virtueller Umgebungen kontinuierlich auf Basis wissenschaftlicher Evidenzen auszubauen. Weiterhin fällt auf, dass sich die überwiegende Zahl der publizierten Studien auf die Untersuchung des Präsenzerlebens, der *usability*, *simulator sickness* und Performanz in Abhängigkeit der Variation spezifischer Parameter von Visualisierungsumgebungen oder Interaktionsmetaphern beschränkt.

Mit Blick auf den Einsatz von VR in der Aus- und Weiterbildung stehen jedoch andere Fragestellungen im Vordergrund. Unternehmen, welche auf das neue Medium zur Vermittlung von Wissen setzen, sind in erster Linie daran interessiert, ob sich in virtuellen Umgebungen neue Potentiale des beruflichen Lernens erschließen lassen. Wenn sich Bildungsträger oder klein- und mittelständige Unternehmen entscheiden, die Auszubildenden/Fachkräfte zur Qualifizierung in ein virtuelles Szenario eintauchen zu lassen, dann steht beispielsweise die Frage im Raum, ob und in welcher Richtung die Kombination aus Visualisierungssystem und Interaktionsgerät einen Einfluss auf die Leistungsfähig-

keit der Anwender hat. Für viele Ausbildungsbetriebe ist diese Fragestellung mit wichtigen Investitionsentscheidungen verknüpft. Andere Unternehmen verfügen zwar schon heute über verschiedene Hardware-Optionen, jedoch sind auch diese daran interessiert, welche Kombination zu den besten Lernergebnissen sowie der höchsten Zufriedenheit und Akzeptanz virtueller Qualifizierungsmaßnahmen führt.

Wie bereits mehrfach betont, ist die Methodik an der spezifischen Fragestellung zu orientieren. Den vorangegangenen Ausführungen ist zu entnehmen, dass an dieser Stelle die Interaktionmetaphern nicht losgelöst von den Visualisierungsumgebungen betrachtet werden können. Nach Kenntnis der Autoren fehlen jedoch bislang Studien, die verschiedene Kombinationen von Eingabe- und Ausgabetechnologien mit fixen Parametern unter Berücksichtigung von *sense of presence*, *usability*, *simulator sickness* und der Performanz in virtuellen Umgebungen vergleichend betrachten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen geeigneten Messansatz zu entwickeln, der eine vergleichende Untersuchung verschiedener Systemkomponenten ermöglicht. Unter Berücksichtigung der in den Ausbildungsunternehmen begrenzten Anzahl an Versuchspersonen wurde als statistisches Modell die Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) gewählt. Wird der varianzanalytische Ansatz unter Berücksichtigung der vorgestellten theoretischen Grundlagen weiter differenziert, ergeben sich die Hypothesen der vorliegenden Untersuchung.

2.4.1 Hypothesen

Performanz

H1: Die Performanz im virtuellen Basisszenario unterscheidet sich in Abhängigkeit des Visualisierungssystems.

H2: Die Performanz im virtuellen Basisszenario unterscheidet sich in Abhängigkeit des Interaktionsgerätes.

H3: Die Performanz im virtuellen Basisszenario unterscheidet sich in Abhängigkeit der räumlichen Intelligenz. Versuchspersonen mit hoher Ausprägung der räumlichen Intelligenz erzielen bessere Testleistungen als Probanden mit niedriger Ausprägung⁴.

Sense of presence

H4: Das Präsenzerleben ist positiv mit der Präsenzbereitschaft korreliert.

H5: Präsenz wird in immersiven virtuellen Umgebungen stärker erlebt als in non-immersiven virtuellen Umgebungen.

Usability

H6: Die *usability* im virtuellen Basisszenario unterscheidet sich in Abhängigkeit des Visualisierungssystems.

⁴ Die Aufnahme der räumlichen Intelligenz als Zwischensubjektfaktor erklärt sich unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung des virtuellen Basisszenarios (vgl. Kap. 3.3.1.2).

H7: Die *usability* im virtuellen Basisszenario unterscheidet sich in Abhängigkeit des Interaktionsgerätes.

Akzeptanz

H6: Die Akzeptanz der virtuellen Umgebung unterscheidet sich in Abhängigkeit des Visualisierungssystems.

H7: Die Akzeptanz der virtuellen Umgebung unterscheidet sich in Abhängigkeit des Interaktionsgerätes.

Simulator sickness

H8: Die *simulator sickness* unterscheidet sich in Abhängigkeit des Visualisierungssystems. Die Symptomatik der *simulator sickness* ist in hoch-immersiven virtuellen Umgebungen stärker ausgeprägt als in niedrig-immersiven virtuellen Umgebungen.

Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen

Performanz und *sense of presence*

H9: Eine stärkere Ausprägung des *sense of presence* geht mit einer besseren Performanz bei der Bearbeitung von Aufgaben in virtuellen Umgebungen einher.

Performanz und *usability*

H10: Eine bessere Bewertung der *usability* spiegelt sich in besseren Testleistungen wider.

Performanz und *simulator sickness*

H11: Das Auftreten von *simulator sickness* führt zu einer schwächeren Performanz bei der Aufgabebearbeitung in virtuellen Umgebungen.

Sense of presence und *usability*

H12: Eine stärkere Ausprägung der Präsenzbereitschaft steht im Zusammenhang mit einer höheren Einschätzung der *usability* des virtuellen Szenarios.

Sense of presence und *simulator sickness*

H13: Versuchspersonen, die ein stärkeres Erleben von Präsenz in virtuellen Umgebungen berichten, sind für die *simulator sickness* vulnerabler.

3. Methode

3.1 Stichprobe

Am Experiment nahmen 36 Versuchspersonen (18 Männer, 18 Frauen, Durchschnittsalter: 24.3 Jahre, SD: 4.33, range: 19-41 Jahre) teil, die als Studierende an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg eingeschrieben sind. Insgesamt nahmen 33 Studierende des Studienfaches Psychologie, zwei Studierende der Geisteswissenschaften und ein Studierender der Naturwissenschaften teil. Die Versuchsteilnehmer/innen⁵ wurden mittels Aushängen sowie Listen in den Lehrveranstaltungen auf die Studie aufmerksam gemacht. Alle Probanden waren physisch sowie psychisch gesund und erklärten schriftlich Ihr Einverständnis zur Teilnahme an der Untersuchung. Die Versuchspersonen hatten ein normales oder zu normal korrigiertes Sehvermögen.

Mit Ausnahme der Studierenden des Studienfaches Psychologie, welche sich die Dauer der Datenerhebung als Versuchspersonenstunden anrechnen lassen können, erhielten die Versuchspersonen keine Aufwandsentschädigung für die Teilnahme an der Untersuchung.

Zwei Probanden wurden von der statistischen Analyse ausgeschlossen, deren Bearbeitungszeiten des Basisszenarios für mindestens ein Visualisierungssystem den 1.5-fachen Interquartilabstand der Gesamtstichprobe überschritten (vgl. Fahrmeir, Künstler, Pigeot & Tutz, 2007). Damit wurden die Daten von 34 Versuchspersonen in die statistische Auswertung aufgenommen.

3.2 Stimulusmaterial und Instruktion

Um die psychologischen Konstrukte (vgl. Kap. 2.3) unter Berücksichtigung verschiedener Anzeige- und Interaktionsgeräte und in Relation zu den erbrachten Leistungen untersuchen zu können, bedarf es der Implementierung eines virtuellen Szenarios, welches eine adäquate Aufgabenstellung beinhaltet. Für die experimentelle Untersuchung wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes „ViERforES“ von Softwareentwicklern des Fraunhofer IFF ein virtuelles Basisszenario für interaktive 3D-Umgebung programmiert.

Die Stimuli des Basisszenarios bilden die Würfelförper respektive Steine des klassischen Somawürfels. Dieser von Piet Hein entwickelte Somawürfel besteht aus sieben Würfelsegmenten, welche sich wiederum aus 27 einzelnen Kuben zusammensetzen. Die beschriebenen Segmente des Somawürfels sind in Abbildung 1 dargestellt, wobei gleichzeitig zu erkennen ist, dass er aus einem dreigliedrigen sowie sechs viergliedrigen Steinen besteht, wobei sich letztgenannte weiter in flache (T, S und L) und dreidimensionale Formen differenzieren lassen (Gardner, 1986).



Abb. 1: Die sieben Einzelelemente des Somawürfels.

Das geometrische Modell der verwendeten Objekte wurde mit der Software 3D Studio Max (<http://www.autodesk.de>) konstruiert. Wie die Abbildung 2 zeigt, wurden die Würfelfiguren ver-

⁵ Unter Berücksichtigung einer verbesserten Lesbarkeit der Arbeit werden fortfolgend die Termini Probanden, Versuchsteilnehmer oder Versuchspersonen verwendet, welche gleichsam die weiblichen und männlichen Teilnehmer der Studie bezeichnen.

schiedenfarbig visualisiert und auf einer grauen virtuellen Tischplatte präsentiert, die sich vor einem schwarzen Hintergrund befand. Die Umsetzung der Funktionen (Navigation, Manipulation) des virtuellen Basisszenarios erfolgte in Kombination einer systeminternen Skriptsprache des Fraunhofer IFF und des VR-Autors (C++), welcher anhand eines dreidimensionalen Koordinatensystems die virtuelle Länge, Fläche und das Volumen von Objekten definiert. Diese Parameter werden in virtuellen Einheiten angegeben, wobei die Kantenlänge der einzelnen Kuben auf eine virtuelle Einheit gesetzt wurde. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, mit Hilfe des Interaktionsgerätes (vgl. Kap. 2.2.2) die einzelnen Würfelnkörper in ein transparentes Abbild des Körpers einzufügen, was die Ausführung verschiedene Teilschritte impliziert.

In einem ersten Schritt mussten die Probanden ein Avatar in der virtuellen Szenerie aufrufen, der die Form eines Kegels aufwies. Vom Avatar ging ein roter Laserstrahl aus, welcher zum Selektieren eines Würfelnkörpers genutzt werden konnte. Dazu musste der Laserstrahl auf das zu selektierende Objekt ausgerichtet werden, wobei die Reihenfolge den Versuchspersonen nicht vorgegeben war. Im Anschluss an die Selektion des Würfelnkörpers erschien im Basisszenario ein deckungsgleiches Transparent (vgl. Abb. 2) und die Aufforderung: „Positioniere das Element deckungsgleich in das Abbild!“. Dazu konnte der Proband den gewählten Körper mittels Translation und Rotation im dreidimensionalen Raum bewegen.

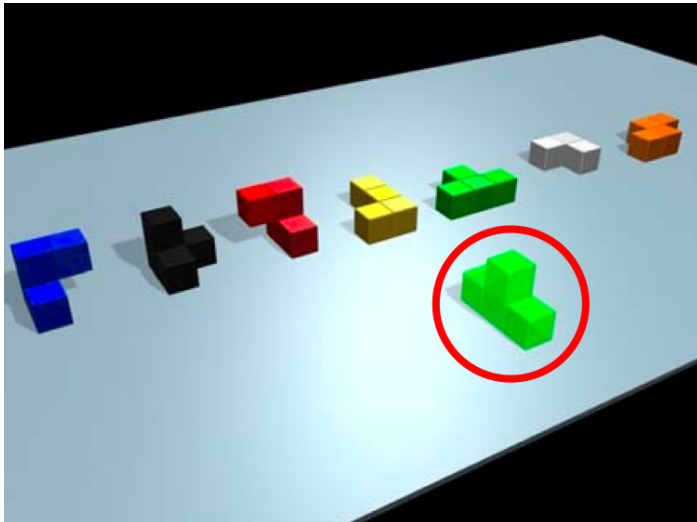


Abb. 2: Darstellung der farblich visualisierten Würfelnsegmente im virtuellen Basisszenario. Das im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung erscheinende Transparent ist mit einem roten Kreis markiert (Bild: FRAUNHOFER/IFF).

Darüber hinaus war es möglich, selektierte Steine wieder loszulassen, um andere zu bearbeiten oder die Kameraperspektive zu verändern, um einen besseren Blickwinkel im Raum zu erhalten. Die Versuchspersonen konnten zu jeder Zeit zwischen Objektmanipulation und der Kameraperspektive wechseln. Wurde das Ziel, ergo die erfolgreiche Platzierung des Würfelnkörpers im Transparent erreicht, erhielten die Versuchspersonen sowohl ein auditives Feedback (Klatschen) als auch ein visuelles Feedback: „Diese Aufgabe wurde erfolgreich absolviert!“. In der Folge mussten die Probanden wieder den Avatar anwählen, um den nächsten Würfelnkörper zu selektieren.

Vorab der Versuchsreihe wurden die Probanden an einem Notebook der Marke Dell (Modell: M6300; Technische Spezifikation: Intel Core 2 Duo T7700 mit 2.4 GHz, 2.0 GB RAM, NVIDIA Quadro FX 1600M mit 512 MB, Auflösung: 1280 x 1024 Pixel, Frequenz: 60 Hz) instruiert. Die Aufgabenstellung wurde inhaltlich erklärt und die Tastenbelegung des Interaktionsgerätes hinsichtlich der verschiedenen Funktionen erläutert. Im Anschluss an die Instruktion konnten die Probanden individuell üben, bis sie

sich im Umgang mit dem Eingabegerät sicher fühlten. Für Rückfragen zur Bedienung des Eingabegerätes, Eigenschaften des Basisszenarios etc. stand der Versuchsleiter zur Verfügung. Im Anschluss an die Einweisung wurden die Versuchspersonen angewiesen, die Aufgabe so schnell und exakt wie möglich zu bearbeiten.

3.3 Experimentalaufbau

3.3.1 Versuchsablauf

Die Datenerhebung erfolgte in drei Phasen (vgl. Abb. 3), wobei das experimentelle Setting in die Fragebogenverfahren 1 (FB 1) und Fragebogenverfahren 2 (FB 2) eingebettet ist (vgl. Jenewein & Hundt, 2009).

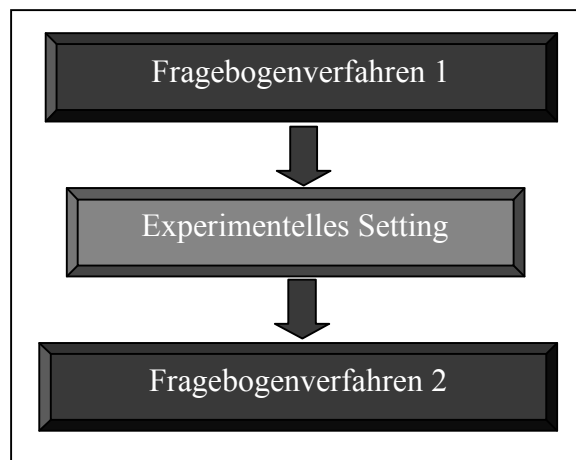


Abb. 3: Die drei Stufen der Datenerhebung.

3.3.1.1 Fragebogenverfahren 1

Das FB 1, welches ca. 14 Tage im Vorfeld der experimentellen Untersuchung erfolgte, diente der Erhebung einer Vielzahl von Variablen, welche häufig im Zusammenhang mit dem Erleben und der Performanz in virtuellen Umgebungen diskutiert werden. Dazu wurden die Probanden gebeten, in einem digitalen Fragebogen (E-Mail-Befragung) Items zur Demographie, Computererfahrung, PC- und Konsolenspielerfahrung sowie zur Präsenzbereitschaft zu beantworten. Zusätzlich wurde die räumliche Intelligenz der Probanden erfasst, was inhaltlich dem FB 1 zuzurechnen ist, jedoch aus administrativen Gründen erst am Tag der experimentellen Untersuchung durchgeführt werden konnte. Nachfolgend werden die erhobenen Variablen im Einzelnen aufgeführt, wobei jeweils kurz auf die Verwendung der Variable in der vorliegenden Untersuchung eingegangen wird.

Geschlecht

In einer Vielzahl von Studien konnten wiederholt geschlechtsspezifische Unterschiede nachgewiesen werden, was für den Bereich der Computernutzung (Postmes, Spears & Lea, 1999; Waller, Hunt & Knapp, 1998) ebenso gilt, wie für den Umgang mit sowie der Performanz in virtuellen Szenarien (Cherny, 1994; Cutmore, Hine, Maberly, Langford & Hawgood, 2000; Lombard et al., 1997). Weiterhin zeigten sich Frauen vulnerabler für die Symptomatik der *simulator sickness* (Barfield et al., 1993). Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurde das Geschlecht der Versuchspersonen neben dem Interaktionsgerät als weiterer Faktor in die Varianzanalysen aufgenommen.

Alter

Das Alter kann einen wichtigen Einfluss auf das Präsenzerleben in virtuellen Umgebungen haben (Barfield et al., 1993; Lombard et al., 1997; Steuer, 1992), was sich letztlich - wie in Kapitel 2.4 beschrieben - entscheidend auf die Performanz auswirken kann. Demnach werden die Faktorstufen auf *a-priori* Unterschiede in der Alterstruktur untersucht.

Präsenzbereitschaft

Die immersive Tendenz der Probanden wurde durch den ins Deutsche übersetzte *ITQ* (Witmer et al., 1998) erfasst. Dazu beantworteten die Versuchspersonen insgesamt 18 Items auf einer siebenstufigen Likert-Skala. Zwei der Items, welche sich auf das aktuelle körperliche Befinden der Anwender bezieht, wurden in das FB 2 integriert und den Teilnehmern der Studie erst am Tag der experimentellen Untersuchung vorgelegt. Auch hinsichtlich der Präsenzbereitschaft sollen sich die Faktorstufen nicht unterscheiden.

Computererfahrung

Die Erfahrung im Umgang mit Computern wurde ermittelt, indem die Versuchspersonen angaben, wie viele Stunden sie den Computer täglich aktiv nutzen. Die gewonnenen Daten wurden genutzt, um die Versuchsgruppen hinsichtlich der Computererfahrung zu parallelisieren (engl.: *matching*).

Erfahrung mit PC- und Konsolenspielen

Vergleichbar mit der Erhebung der Computererfahrung sollten die Versuchspersonen angeben, an wie vielen Tagen pro Woche sie Computer- oder Konsolenspielen nachgehen. Die Faktorstufen sollen sich hinsichtlich der Erfahrung mit PC- und Konsolenspielen nicht unterscheiden.

Räumliche Intelligenz

Auch die räumliche Intelligenz beeinflusst das Erleben in virtuellen Umgebungen, was sich sowohl auf die Performanz als auch auf die Symptomatik der *simulator sickness* auswirken kann (vgl. Bowman, 1999; Parker & Harm, 1992).

Zur Messung der räumlichen Intelligenz waren die Versuchspersonen aufgefordert, vor der Konfrontation mit den VR-Bedingungen die computergestützte Version des *Mental Rotation Tests* (MRT) zu bearbeiten (Peters, Laeng, Lathan, Jackson, Zaiyouna & Richardson, 1995). Der MRT basiert auf dreidimensionalen Objekten, die sich aus mehreren Würfeln zusammensetzen (vgl. Shepard & Metzler, 1971). Innerhalb des Tests werden den Versuchspersonen jeweils ein Zielreiz (Stimulus) sowie vier Vergleichsreize präsentiert (vgl. Abb. 3).

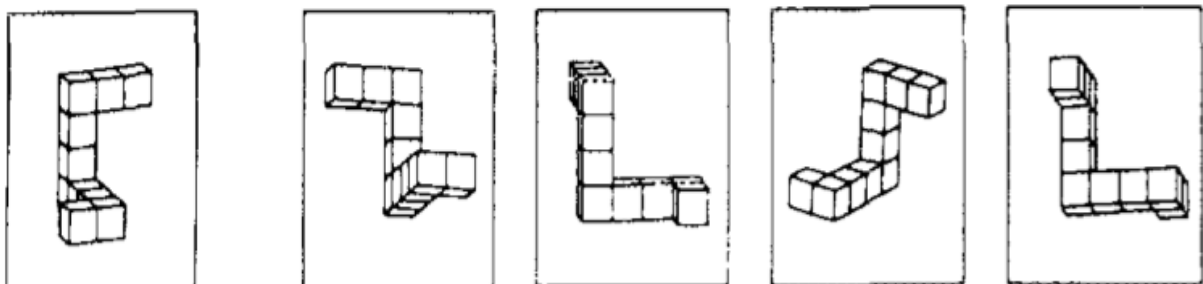


Abb. 3: Beispielitem des MRT. Der linke Stimulus ist der Zielreiz. Rechts befinden sich die Vergleichsreize von denen jeweils zwei der rotierten Versionen des Zielreizes entsprechen (aus: Peters et al., 1995).

Die Aufgabe der Versuchspersonen besteht darin, die Vergleichsreize gedanklich zu drehen, um die Übereinstimmung mit dem Zielreiz zu ermitteln und anschließend die zwei zu kennzeichnen, welche mit der Standardwürfel figur identisch sind. Die Kennzeichnung erfolgt in der digitalen Version des MRT durch das Anklicken der zwei ausgewählten Vergleichsreize, welche nach der Selektion durch ein rotes Kreuz markiert sind.

Der MRT gliedert sich in zwei Hälften (Teil A und Teil B), wobei jeder Teil 12 Testaufgaben beinhaltet, für deren Bearbeitung den Probanden jeweils drei Minuten Zeit zur Verfügung stehen. Im Anschluss an die erste Testhälfte folgt eine kurze Pause, deren Dauer die Versuchspersonen selbst bestimmen. Danach starten sie selbständig den Teil B und es werden Ihnen die Aufgaben der zweiten Testhälfte präsentiert.

Die Durchführung des MRT erfolgte an dem gleichen Notebook, welches zur Einführung der Versuchspersonen in die Interaktion mit dem Basisszenario eingesetzt wurde. Vor der Testung erhielten die Versuchspersonen die Möglichkeit einige Aufgaben im Trainingsmodus zu bearbeiten und dabei auftretende Rückfragen an den Versuchsleiter zu stellen. Durch die eigentliche Untersuchung führt die Versuchspersonen die Menüführung, womit die Anwesenheit des Versuchsleiters nicht mehr nötig ist. Vorab wurden die Probanden instruiert, die Aufgaben so schnell und korrekt wie möglich zu lösen.

Im Anschluss an die Durchführung erhielten die Versuchspersonen ein Feedback über die erzielte Leistung im MRT.

3.3.1.2 Experimentelles Setting - Versuchsdesign

Die experimentelle Untersuchung ist als mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung angelegt. Die *between*-Faktoren Interaktion und Geschlecht sind zweifach gestuft: Wii-Remote vs. Rumblepad und maskulin vs. feminin. Die Visualisierung bildet den *within*-Faktor mit Messwiederholung, welcher dreifach gestuft ist: desktopbasiertes Projektionssystem vs. Großprojektionssystem vs. stereoskopische Powerwallprojektion.

Tab. 1: Versuchsplan mit Anzahl der Versuchspersonen auf den Stufen der Faktoren.

Interaktion	Geschlecht	Visualisierung		
		Desktopbasiertes Projektionssystem	Großprojektionssystem	Stereoskopische Powerwallprojektion
Wii-Remote	maskulin	18 Versuchspersonen		
	feminin			
Rumblepad	maskulin	18 Versuchspersonen		
	feminin			

Die Versuchspersonen bearbeiteten das Basisszenario mit jeweils einem Interaktionsgerät an allen Anzeigesystemen, wobei die Treatmentreihenfolge interindividuell unvollständig ausbalanciert wurde (A-B-C, B-C-A, C-A-B), um Sequenzeffekte zu kontrollieren.

Die Zuordnung der Probanden auf die Faktorstufen erfolgte unter Anwendung der Daten des FB 1. Die Faktorstufen der Interaktion wurden hinsichtlich des Geschlechtes gleich häufig besetzt. Zusätzlich erfolgte eine Parallelisierung der Versuchspersonen anhand der Computererfahrung mit anschließender Randomisierung zu den experimentellen Bedingungen.

Da die Aufgabenstellung im virtuellen Basisszenario überwiegend auf der Translation und Rotation von Objekten im dreidimensionalen Raum beruht, ist ein starker Einfluss der räumlichen Intelligenz auf die Performanz der Probanden anzunehmen. Unter Berücksichtigung dessen wurde zur Auswer-

tung der abhängigen Variable Performanz neben den Faktoren Interaktion und Geschlecht die räumliche Intelligenz als weiterer *between*-Faktor in die Varianzanalyse aufgenommen. Dazu wurden die Versuchspersonen anhand der Leistung im MRT mittels Median-Split in zwei Versuchsgruppen dichotomisiert, wonach sich eine Gruppe mit niedriger Ausprägung in der räumlichen Intelligenz (MRT_1) und eine Gruppe mit hoher Ausprägung in der räumlichen Intelligenz (MRT_2) ergab. Die Performanz der Versuchspersonen wird über die Gesamtbearbeitungszeit des Basisszenarios erfasst, wozu die Systemsteuerung für jede Versuchsperson die entsprechenden *logfile*s aufzeichnete.

3.3.1.3 Fragebogenverfahren 2

Aufgrund des Versuchsdesigns mit Messwiederholung waren die Probanden jeweils im Anschluss an die Aufgabenbearbeitung in der virtuellen Umgebung aufgefordert, das FB 2 zu absolvieren, was pro Durchgang ca. 20 Minuten beanspruchte. Das FB 2 diente der Erhebung der abhängigen Variablen *sense of presence*, *usability* und *simulator sickness*. Darüber hinaus hatten die Probanden die Möglichkeit im offenen Antwortformat die Vor- und Nachteile des virtuellen Szenarios subjektiv einzuschätzen und das Interaktionsgerät sowie die Visualisierungsumgebungen in Form von Schulnoten zu bewerten. Die zur Datenerhebung eingesetzten Verfahren und Instrumente werden nachfolgend kurz skizziert (vgl. auch Kap. 2.3.4).

Sense of presence

Das Präsenzerleben wurde mit Hilfe des *PQ* (Witmer & Singer, 1998) erhoben, wozu die Originalitems aus dem angloamerikanischen Sprachraum ins Deutsche übersetzt wurden. Die Versuchspersonen beantworteten 19 Items, wobei sie ihr individuelles Empfinden in der virtuellen Szenerie auf einer siebenstufigen Likert-Skala bewerteten.

Usability

Zur Erhebung der Gebrauchstauglichkeit wurde ein Fragebogen erstellt, welcher sich aus der Kombination von 25 Items des *SUMI* (Kirakowski et al., 1993), vier Items des *QUIS* (Shneiderman, 1987) sowie ein selbständig konstruiertes Item ergab. Damit umfasst der Fragebogen zur *usability* insgesamt 30 Items, wobei die Items den originalen Fragebögen entnommen, ins Deutsche übersetzt und der Hypothesen entsprechend angepasst wurden. Daraus resultierte ein Messinstrument, welches eine systemübergreifende Applikation und damit eine vergleichende Messung verschiedener virtueller Umgebungen erlaubt.

Simulator sickness

Die Symptome der Simulatorkrankheit wurden mit dem *SSQ* (Kennedy et al., 1993) gemessen. Dazu wurden die Items aus dem Englischen ins Deutsche übersetzt, welche die Probanden sukzessive auf einer vierstufigen Likert-Skala von 0 (trifft nicht zu) bis 3 (schwer) kodierten. Um eine *baseline* zur Bewertung der Symptome zu erhalten, wurde der *SSQ* ein erstes Mal im Anschluss an den MRT und damit vorab der experimentellen Untersuchung ausgefüllt.

Unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten des virtuellen Basisszenarios, der Fragebogenerhebung sowie Pausen und Wechsel der Projektionssysteme beanspruchte die gesamte Untersuchung insgesamt ca. 120 – 180 Minuten. Abschließend wurden die Versuchspersonen ausführlich über das

Anliegen der Untersuchung informiert und im Falle von Studierenden des Studienfaches Psychologie die Versuchspersonenstunden bescheinigt.

3.3.2 Technische Parameter der Virtuellen Realität

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, ergibt sich die technische Umsetzung einer VR-Applikation aus der Integration der Komponenten des *virtual environment display*, *virtual environment control* sowie des *real environment sensing*. Diese Bestandteile werden nachfolgend unter Berücksichtigung der technischen Spezifikationen der vorliegenden Untersuchung vorgestellt.

3.3.2.1 *Virtual environment display*

Zur Visualisierung des virtuellen Basisszenarios wurden in der Studie drei Ausgabetechnologien eingesetzt, welche vom Virtual Development Training Centre (VDTC) des Fraunhofer IFF, Magdeburg zur Verfügung gestellt wurden.

1. desktopbasiertes Projektionssystem

Die zweidimensionale Visualisierung der Applikation erfolgte mit einem DLP-Videoprojektor (Modell: Nec LT280, 2500 ANSI-Lumen), welcher das Szenario auf eine Leinwand (1300 x 900 mm) mit einer Auflösung von 1024 x 768 Pixel und einer Frequenz von 60 Hz projizierte. Die Distanz zwischen Versuchspersonen und Leinwand betrug 700 mm, wobei die Probanden selbst entscheiden konnten, ob sie die Aufgabe stehend oder sitzend bearbeiten.

2. Großprojektionssystem

Für diese Projektion wurde eine spezielle Projektionsfläche der Firma Astrotec eingesetzt, welche aus gelochtem Aluminium besteht. Die visuellen Informationen wurden mit drei Laser-Projektoren der JENOPTIK LDT GmbH (Modell: Generation 2, 1.300 Lumen) mit einer Gesamtauflösung von ca. 4000 x 1000 Pixel und einer Bildwiederholrate von 60 Hz auf eine Gesamtfläche von 15.000 x 6.000 mm projiziert. Um ein zusammenhängendes Bild zu erhalten, werden die Laserbilder synchronisiert, ineinander geblendet und zu einem homogenen Gesamtbild zusammengeführt. Die damit in Verbindung stehenden Kantenüberblendungen und Entzerrungen der Laser-Projektoren erklären die Schwankungen in der Auflösung.

Aufgrund der Größe der Projektion und unter Berücksichtigung des variablen Hintergrundes, welcher sich aus der jeweiligen Kameraperspektive ergibt, variiert das *FoV* zwischen 150 und 180 Grad.

Unter Berücksichtigung des *FoV* und der fehlenden stereoskopischen Projektion ist es den Versuchspersonen nicht möglich, eine Größenrelation der virtuell präsentierten Stimuli mit Gegenständen aus der Realität herzustellen, da ihnen kein realer Fixationspunkt zur Verfügung steht. Die Probanden können einzig die Größe von Objekten relativ zu sonstigen Stimuli in der virtuellen Umgebung bewerten. Dies erzeugt im Zusammenhang mit den guten Kontrasten und Black-Level, dem hohen Farbspektrum sowie der unbegrenzten Tiefenschärfe einen quasistereoskopischen Effekt, welcher einen räumlichen Eindruck vermittelt.

Die Versuchspersonen befanden sich während der Testung auf einem 700 mm hohen kreisrunden Besucherpodest, welches insgesamt eine Fläche von ca. 48 Quadratmeter bemisst. Innerhalb dieser Fläche konnten sich die Probanden mit dem Interaktionsgerät frei bewegen. Zum Schutz vor den Laserstrahlen ist das Besucherpodest mit einem Schutzgeländer umspannt. Zusätzlich befindet sich

zwischen der Projektionsoberfläche und dem Besucherpodest ein Schutzbereich, welcher bei der Detektion von Bewegung die Laser-Projektion unterbricht.

3. stereoskopische Powerwallprojektion

Die stereoskopische Powerwallprojektion gehört zur Gruppe der Stereoprojektionsleinwände und ermöglicht eine interaktive, dreidimensionale Darstellung virtueller Inhalte. Die Visualisierung erfolgt durch zwei DLP-Projektoren (Modell: Evo2sx, 2500 ANSI-Lumen), welche das Stimulusmaterial mit einer Auflösung von 1400 x 1050 Pixel und einer Frequenz von 60 Hz auf eine 1300 x 900 x 3 mm Rückprojektionsleinwand überträgt, die sich zwischen dem Betrachter und den Projektoren befindet. Wie in Abb. 4 skizziert, saßen die Versuchspersonen während der Aufgabenbearbeitung an einem 700 mm tiefen Arbeitsplatz, der sich direkt vor der Rückprojektionsleinwand befindet, womit sich ein FoV von 75 Grad ergibt. Wie in Kapitel xxx beschrieben, trugen die Probanden zur Integration der Bilder eine Polarisationsbrille.

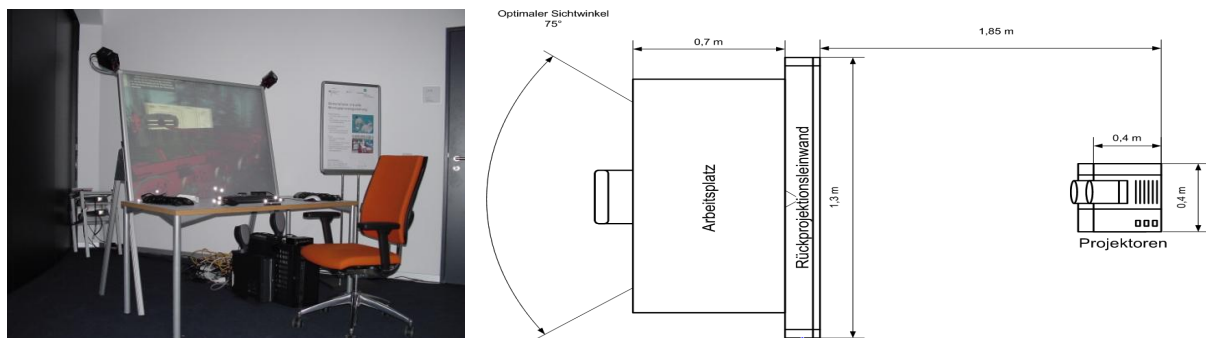


Abb. 4: *Links*: Hardware der stereoskopischen Powerwallprojektion. *Rechts*: Skizzierter Aufbau der stereoskopischen Powerwallprojektion (Fotos/Bilder: FRAUNHOFER IFF).

3.3.2.2 Virtual environment control

1. Cordless Logitech Rumblepad 2

Das Cordless Rumblepad 2 der Firma Logitech wird vom Nutzer beidhändig gesteuert, wozu der Gamecontroller an den strukturierten Gummigriffflächen gefasst wird. Das Interaktionsgerät verfügt über zehn programmierbare Aktionstasten, einen Acht-Wege-Richtungsblock sowie zwei Analog-Sticks, deren Funktionen sich unter Verwendung eines Software-Paketes individuell belegen lassen. Die Belegung des Logitech Rumblepad 2 zur Steuerung des Basisszenarios, wie sie auch den Versuchspersonen zur Instruktion vorgelegt wurde, ist in Abbildung 5 illustriert.

Der Datenaustausch zwischen dem Logitech Rumblepad 2 und der Systemsteuerung erfolgt über eine fixe drahtlose Verbindung, deren Frequenz durch die mitgelieferten Gerätetreiber der Firma Logitech vorgegeben ist.

2. Nintendo Wii-Remote mit Nunchuk

Der von Nintendo entwickelte Wii-Remote-Controller verfügt über sieben Aktionstasten, die mit Ausnahme der B-Taste, welche sich auf der Unterseite des Controllers befindet, auf der Oberseite verortet sind, wo sich auch das Digitalsteuerkreuz des Gamecontrollers befindet. Die Besonderheit der Wii-Remote besteht darin, dass sie mit einem Accelerometer ausgestattet ist, welcher die Translationen und Rotationen im dreidimensionalen Raum erfasst. Dieses technische Detail erlaubt es dem

Nutzer, über die eigenen Bewegungen im dreidimensionalen Raum mit einer virtuellen Szenerie zu interagieren.



Abb. 5: Das cordless Logitech Rumblepad 2 mit den Erklärungen der Tastenbelegung zur Steuerung im virtuellen Basisszenario.

Der Nunchuk ist eine Erweiterung des Wii-Remote-Controllers. Er ist mit einem Analog-Stick, zwei Aktionstasten (C und Z) auf der Unterseite sowie einem eigenen Beschleunigungssensor ausgestattet, der die Bewegungen des Nunchuks verzeichnet. Die Wii-Remote mit Nunchuk erlaubt ebenfalls eine kabellose Interaktion, wobei Nintendo zum Datenaustausch die Bluetooth-Technologie nutzt. In der vorliegenden Studie wurde die Bluetooth-Verbindung mit der Software BlueSoleil 6 (www.bluesoleil.com) hergestellt. Die funktionale Belegung der Wii-Remote in der vorliegenden Studie, ist der Abbildung 6 zu entnehmen. Die gleiche Darstellung wurde zur Instruktion der Versuchspersonen eingesetzt.

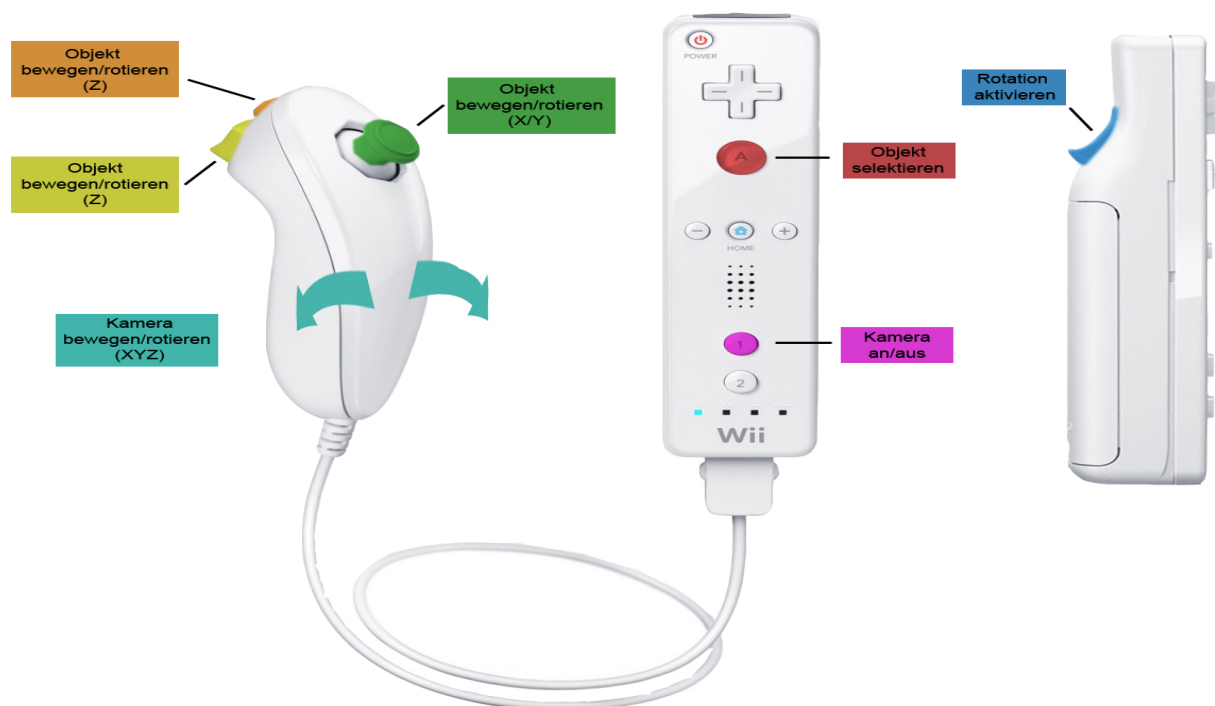


Abb. 6: Die Wii-Remote mit Nunchuk inklusive der Erläuterung der Tastenbelegung zur Steuerung im virtuellen Basisszenario.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass beide Interaktionsmetaphern eine kabellose Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ermöglichen. Weiterhin offerieren beide Game-controller die Möglichkeit der beidhändigen Interaktion, was einer natürlichen Interaktion entspricht, da die Anwender virtueller Umgebungen auch in der Realität zumeist zweihändig agieren (vgl. Rattay, Geiger, Herder, Goebbels & Nikitin, 2007).

3.3.2.3 Real environment sensing

1. desktopbasiertes Projektionssystem

Als Schnittstelle zwischen dem Eingabe- und Anzeigesystem fungierte das gleiche Notebook, welches zur Instruktion der Probanden sowie zur Durchführung des MRT eingesetzt wurde (vgl. Kap. 3.2 für die technische Spezifikation).

2. Großprojektionssystem

Das Interface wird durch ein Workstation-Cluster gebildet, wobei jedem Laser-Projektor eine separate Workstation der Firma Schneider-digital (Modell: SDIG Ultra 280 Opteron, 2.41 GHz, 8 GB RAM, NVIDIA Quadro FX 5500 mit 1 GB) zugeordnet ist. Die aus dem Zusammenspiel von Projektionssystem und Interaktionsgerät resultierenden Informationen werden von einer weiteren Workstation gleicher Bauart verarbeitet und synchronisiert. Die Workstations sind in einem *rack* (engl: *rack* = Einbaugeschäft) verbaut.

3. stereoskopische Powerwallprojektion

Die Steuerung des Systems wurde durch ein Workstation (Modell: SDIG Ultra 254 Opteron, 2.8 GHz, 4 GB RAM, PNY Quadro FX 5500 mit 1 GB) der Firma Schneider-digital realisiert.

3.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit der Statistik-Software PASW 18.0.0 für Windows (<http://www.spss.com>). Die Graphiken wurden mittels Adobe Photoshop CS4 11.0.1 für MacOSX (<http://adobe-photoshop.softonic.de/mac>) und Microsoft Excel 2004 für MacOSX (<http://www.microsoft.com>) bearbeitet.

4. Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung orientiert sich an dem in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Versuchsablauf. Demnach wurden zunächst die *between*-Faktoren auf *a-priori* Unterschiede hinsichtlich der im FB 1 erhobenen Kontrollvariablen untersucht. Dazu wurden einfaktorielle Varianzanalysen mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ für die einzelnen Faktorstufenkombinationen gerechnet. Anschließend werden die Reliabilitäten der Messinstrumente referiert, welche die Voraussetzung zur Interpretation der Ergebnisse bilden.

Abschließend werden die in Kap. 2.4.1 formulierten Hypothesen überprüft, wobei die Berechnung der Varianzanalysen mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ erfolgte. Die *post-hoc* t-Tests wurden für abhängige Stichproben (paarweise, zweiseitig) gerechnet, wobei α auf .05 festgelegt und Bonferroni adjustiert wurde. Um die Zusammenhangshypothesen zwischen den abhängigen Variablen zu überprüfen, wurden bivariate Korrelationen (einseitig) mit $\alpha = .05$ gerechnet.

4.1 Kontrollvariablen

Innerhalb des FB 1 wurde mit Computererfahrung, Alter, Präsenzbereitschaft, Erfahrung mit PC- und Konsolenspielen eine Reihe von Kontrollvariablen erhoben, welche die Performanz und das Erleben in virtuellen Umgebungen beeinflussen können. Daher sollen sich die Ausprägungen der Versuchspersonen auf den Stufen der Zwischensubjektfaktoren hinsichtlich dieser Variablen *a-priori* nicht unterscheiden.

Wie in Kap. 3.3.1.2 dargestellt, fungiert die Variable räumliche Intelligenz für die abhängigen Variablen *sense of presence*, *usability* und Akzeptanz als Kontrollvariable, während sie theoriegeleitet für die statistische Auswertung der abhängigen Variablen Performanz als weiterer *between*-Faktor (MRT_1, MRT_2) aufgenommen wurde. Demnach wird die Darstellung von *a-priori* Unterschieden zwischen den Versuchsbedingungen für die Variable Performanz gesondert dargestellt (Kap. 4.1.1). Anschließend wird die räumliche Intelligenz als Kontrollvariable für die Faktorstufen Interaktion und Geschlecht behandelt (Kap. 4.1.2).

4.1.1 Performanz

Computererfahrung

Hinsichtlich der Computererfahrung unterscheiden sich die Bedingungen Rumblepad ($M = 3.78$, $SD = 2.44$) und Wii-Remote ($M = 3.72$, $SD = 1.78$) nicht signifikant voneinander ($F_{(1,32)} = .273$, n. s.). Auch für das Geschlecht ergibt sich kein signifikanter Unterschied ($F_{(1,32)} = .705$, n. s.), wobei die männlichen Probanden ($M = 4.17$, $SD = 2.53$) den Computer täglich etwas mehr nutzen als die weiblichen Versuchsteilnehmer ($M = 3.56$, $SD = 1.46$). Auch die Faktorstufen der räumlichen Intelligenz unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($F_{(1,32)} = .425$, n. s.). Dabei nutzen die Versuchspersonen mit einer niedrigeren Ausprägung (MRT_1) den Computer pro Tag ($M = 4.12$, $SD = 2.50$) etwas häufiger als die Probanden mit hoher Merkmalsausprägung ($M = 3.65$, $SD = 1.62$).

Erfahrung mit PC- und Konsolenspielen

Für den Faktor Interaktion unterscheiden sich die Versuchspersonen hinsichtlich der Erfahrung mit PC- und Konsolenspielen nicht signifikant voneinander ($F_{(1,32)} = 2.08$, n. s.), wobei die Teilnehmer in

der Versuchsbedingung Rumblepad ($M = 1.72$, $SD = 1.27$) etwas mehr Zeit in der Woche mit PC- und Konsolenspielen verbringen als die Probanden in der Bedingung Wii-Remote ($M = 1.56$, $SD = 1.03$). Gleiches gilt für den Zwischensubjektfaktor Geschlecht ($F_{(1,32)} = 1.72$, n. s.), wobei die männlichen Probanden ($M = 1.89$, $SD = 1.23$) geringfügig mehr Zeit mit dem Spielen von PC- und Konsolenspielen verbringen als die weiblichen Probanden ($M = 1.38$, $SD = 1.03$). Hinsichtlich der räumlichen Intelligenz investieren die Versuchspersonen der Faktorstufe MRT_1 wöchentlich etwas weniger Zeit in PC- und Konsolenspiele ($M = 1.59$, $SD = 1.18$) als die Probanden der Bedingung MRT_2 ($M = 1.71$, $SD = 1.16$). Auch dieser Unterschied ist statistisch nicht signifikant ($F_{(1,32)} = .086$, n. s.).

Alter

Die Teilnehmenden der Versuchsbedingung Rumblepad ($M = 23.28$, $SD = 3.03$) waren etwas jünger als die Probanden, welche mit der Wii-Remote arbeiteten ($M = 24.63$, $SD = 3.50$). Dieser Unterschied ist nicht signifikant ($F_{(1,32)} = 1.45$, n. s.). Auch hinsichtlich des Geschlechtes unterscheiden sich die Altersstruktur der männlichen Probanden ($M = 23.89$, $SD = 2.54$) nicht signifikant ($F_{(1,32)} = .002$, n. s.) von der weiblicher Versuchspersonen ($M = 23.94$, $SD = 4.04$). Bezüglich der räumlichen Intelligenz sind die Versuchspersonen der Gruppe MRT_1 ($M = 24.35$, $SD = 3.62$) nur geringfügig und nicht signifikant ($F_{(1,32)} = .608$, n. s.) älter als die Probanden der Versuchsgruppe MRT_2 ($M = 23.47$, $SD = 2.94$).

Präsenzbereitschaft

Auch die immersive Tendenz der Versuchspersonen unterscheidet sich für den Zwischensubjektfaktor Interaktion nicht überzufällig voneinander ($F_{(1,32)} = .000$, n. s.). Beide Versuchsgruppen (Rumblepad: $M = 80.36$, $SD = 15.44$; Wii-Remote: $M = 80.38$, $SD = 11.85$) geben eine Präsenzbereitschaft an, welche bemessen an den 126 möglichen Punkten, einer mittelstarken Ausprägung entspricht. Auch in Bezug auf den Faktor Geschlecht unterscheiden sich die männlichen Probanden ($M = 79.53$, $SD = 16.09$) nicht signifikant ($F_{(1,32)} = .141$, n. s.) von den weiblichen Versuchspersonen ($M = 81.31$, $SD = 10.74$). Hinsichtlich der räumlichen Intelligenz gaben die Versuchspersonen der Gruppe MRT_1 ($M = 78.15$, $SD = 15.10$) ein etwas geringere Präsenzbereitschaft als die Probanden der Gruppe MRT_2 ($M = 82.59$, $SD = 12.11$) an, wobei auch dieser Unterschied nicht signifikant ist ($F_{(1,32)} = .895$, n. s.).

4.1.2 Sense of presence, usability

Hinsichtlich der Kontrollvariablen Computererfahrung, Alter, Präsenzbereitschaft, Erfahrung mit PC- und Konsolenspielen gelten die Ergebnisse aus Kap. 4.1.1 entsprechend.

Räumliche Intelligenz

Die Versuchspersonen, welche der Bedingung Rumblepad zugewiesen wurden ($M = 12.94$, $SD = 4.47$) schneiden im MRT etwas schlechter ab als die Probanden der Bedingung Wii-Remote ($M = 14.75$, $SD = 4.95$), wobei die Differenz nicht signifikant ist ($F_{(1,32)} = 1.252$, n. s.). Auch hinsichtlich des Geschlechtes unterscheiden sich die männlichen Probanden ($M = 14.72$, $SD = 4.85$) und weiblichen Versuchspersonen ($M = 12.75$, $SD = 4.48$) nicht signifikant voneinander ($F_{(1,32)} = 1.505$, n. s.).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Stufen der *between*-Faktoren für keine der Kontrollvariablen signifikant unterscheiden.

4.2 Reliabilität

Die Reliabilität der eingesetzten Fragebögen (*ITQ*, *PQ*, *usability*) wurde über den Koeffizient Cronbachs α (vgl. Kap. 2.3.4.1) bestimmt, welcher zur Berechnung der internen Konsistenz einer aus mehreren Items gebildeten Skala eingesetzt wird. Da die Fragebögen zum Präsenzerleben und der *usability* im Rahmen des FB 2 wiederholt eingesetzt wurden, ist die Reliabilität der Instrumente unter Berücksichtigung des Visualisierungssystems ausgewiesen.

4.2.1 Präsenzbereitschaft

Für den ITQ ergibt sich eine interne Konsistenz von $\alpha = .81$, was einer zufriedenstellenden Reliabilität entspricht.

4.2.2 Sense of presence, usability

In der Tabelle 2 sind die Reliabilitäten der Itemskalen für die abhängigen Variablen *sense of presence* und *usability* zusammenfassend dargestellt.

Tab. 2: Cronbachs Alpha der Itemskalen *sense of presence* und *usability* für die einzelnen Anzeigesysteme.

Itemskala	Visualisierung		
	Desktopbasiertes Projektionssystem	Großprojektionssystem	Stereoskopische Powerwallprojektion
<i>sense of presence</i>	$\alpha = .79$	$\alpha = .81$	$\alpha = .79$
<i>usability</i>	$\alpha = .93$	$\alpha = .92$	$\alpha = .93$

Wie der Tabelle 2 zu entnehmen ist, variiert die interne Konsistenz der Itemskala *sense of presence* zwischen $\alpha = .79$ (desktopbasiertes Projektionssystem und stereoskopische Powerwallprojektion) und $\alpha = .81$ (Großprojektionssystem), wonach die Reliabilität der Itemskala als befriedigend zu beurteilen sind.

Für das Konstrukt *usability* ergeben sich mit $\alpha = .92$ (Großprojektionssystem) und $\alpha = .93$ (desktopbasiertes Projektionssystem und stereoskopische Powerwallprojektion) Werte der internen Konsistenz, die auf eine gute Reliabilität der Itemskala verweisen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die interne Konsistenz aller Itemskalen über Cronbachs $\alpha > .70$ liegt, was für eine hinreichend reliable Messung der Konstrukte *sense of presence* und *usability* spricht (Nunnally, 1978, p. 245).

4.3 Hypothesenprüfung

4.3.1 Performanz

Haupteffekte

Für die Bearbeitungszeit der Versuchspersonen ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt des Messwiederholungsfaktors Visualisierung ($F_{(2,52)} = 4.009$, $p = .024$), wonach sich die Performanz für mindestens zwei der Visualisierungssysteme überzufällig voneinander unterscheidet.

Die *post-hoc* ermittelten Ergebnisse des t-Tests zeigen, dass sich die Bearbeitungszeiten zwischen dem desktopbasierten Projektionssystem ($M = 342.15$, $SE = 39.75$) und dem Großprojektionssystem ($M = 250.09$, $SE = 29.37$) mit $t_{(33)} = 2.937$, $p = .028$ signifikant unterscheiden, während sich zwischen den Bedingungen stereoskopische Powerwallprojektion ($M = 286.58$, $SE = 20.84$) und desktopbasiertes Anzeigesystem ($t_{(33)} = 1.530$, n. s.) sowie stereoskopische Powerwallprojektion und Großprojektionssystem ($t_{(33)} = 1.263$, n. s.) keine signifikanten Unterschiede finden. In Abbildung 7 sind die Bearbeitungszeiten des virtuellen Basisszenarios in Abhängigkeit der Visualisierungssysteme graphisch dargestellt.

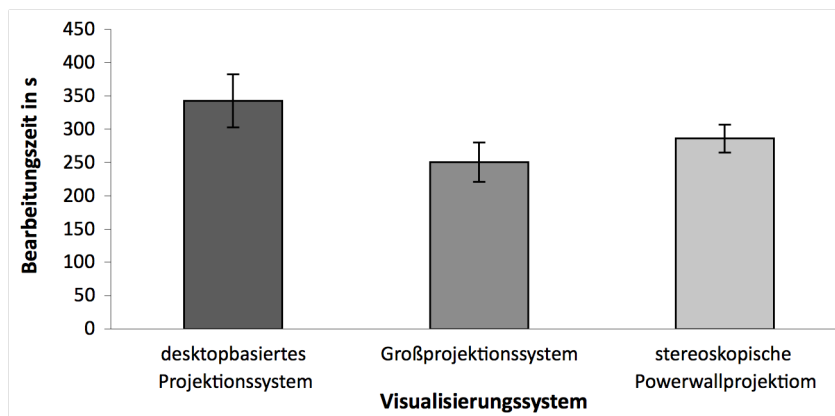


Abb. 7: Haupteffekt des Messwiederholungsfaktors Visualisierung. Die Mittelwerte der Bearbeitungszeiten des virtuellen Basisszenarios sind in Abhängigkeit des Visualisierungssystems dargestellt. Der Fehlerbalken gibt den Standardfehler (SE) wieder.

Der Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass die Bearbeitung der Aufgabenstellung am Großprojektionssystem am wenigstens Zeit beansprucht, während die Probanden am desktopbasierten Projektionssystem für die Bewältigung der Aufgabe die meiste Zeit benötigten.

Die Tests der Zwischensubjekteffekte ergeben einen signifikanten Haupteffekt der räumlichen Intelligenz ($F_{(1,26)} = 6.945$, $p = .014$). Wie die Abbildung 8 zeigt, bearbeiten die Probanden der Gruppe MRT_1 ($M = 357.19$, $SE = 31.88$) das virtuelle Basisszenario langsamer als die Versuchsteilnehmer mit einer hohen Merkmalsausprägung auf dem Faktor räumliche Intelligenz (MRT_2: $M = 228.02$, $SE = 37.23$).

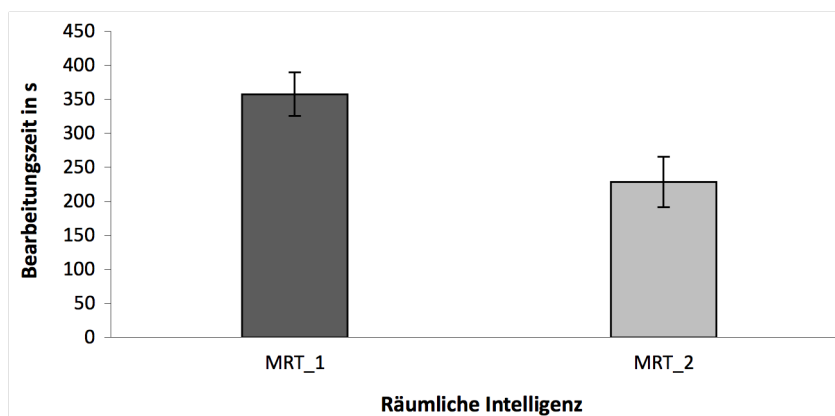


Abb. 8: Haupteffekt des Faktors Räumliche Intelligenz. Die Mittelwerte der Bearbeitungszeiten des Basisszenarios sind in Abhängigkeit der Ausprägung auf dem Faktor räumlichen Intelligenz dargestellt. Der Fehlerbalken gibt den Standardfehler (SE) wieder.

Darüber hinaus finden sich keine signifikanten Haupteffekte für die Zwischensubjektfaktoren. Die Probanden unterscheiden sich weder in Abhängigkeit des Geschlechtes ($F_{(1,26)} = 2.375$, n. s.) noch der Interaktion ($F_{(1,26)} = .035$, n. s.).

Interaktion

Die Interaktion der Faktoren Visualisierung und räumliche Intelligenz wird signifikant ($F_{(2,52)} = 4.835$, $p = .012$). Demnach variiert die Bearbeitungszeit im Basisszenario in Abhängigkeit der Kombination von Anzeigesystem und der Ausprägung auf dem Faktor räumliche Intelligenz. Wie in der Abbildung 9 dargestellt, erzielen die Versuchspersonen des Faktors MRT_2 unter der Bedingung desktopbasiertes Projektionssystem ($M = 249.17$, $SE = 60.39$) eine bessere Testleistung als die Probanden der Faktorstufe MRT_1 ($M = 435.12$, $SE = 51.72$). Auch unter der Bedingung Großprojektionssystem schneiden die Versuchsteilnehmer MRT_2 hinsichtlich der Bearbeitungszeiten besser ab ($M = 155.03$, $SE = 44.62$) als die Probanden der Merkmalsausprägung MRT_1 ($M = 345.15$, $SE = 38.21$). Ein anderer Trend zeigt sich für den Vergleich der Bearbeitungszeiten auf der Faktorstufe stereoskopische Powerwallprojektion. Hier erzielen die Probanden der Faktorstufe MRT_1 ($M = 291.30$, $SE = 27.11$) ähnliche Testleistung wie die Versuchspersonen der Gruppe MRT_2, wenngleich diese auch hier besser abschneiden ($M = 279.86$, $SE = 31.67$).

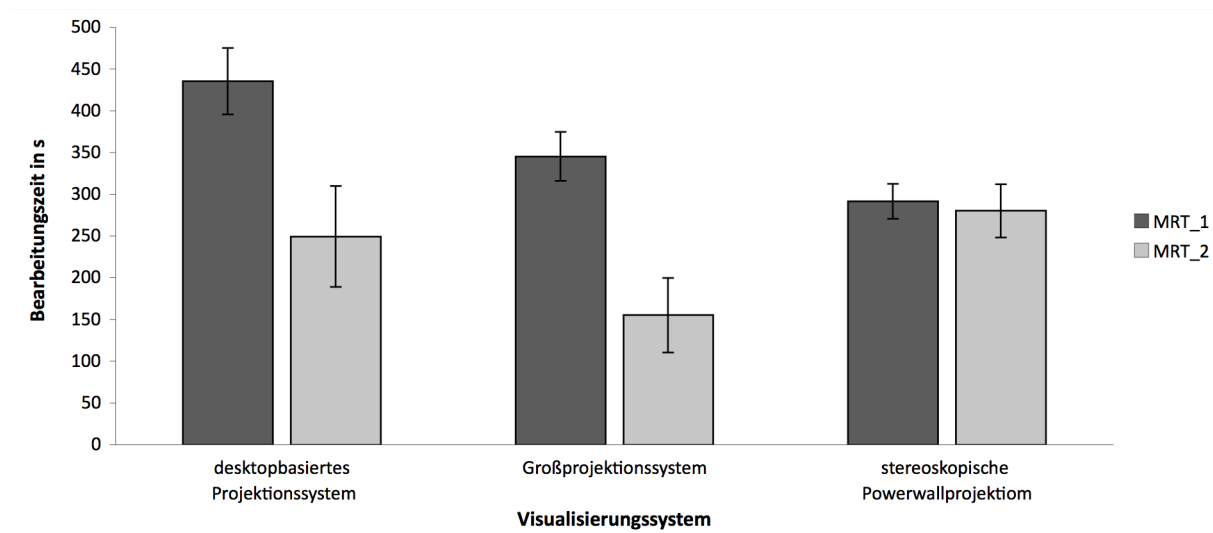


Abb. 9: Interaktionsdiagramm der Bearbeitungszeiten im virtuellen Basisszenario für die Faktoren Visualisierung und räumliche Intelligenz (MRT_1, MRT_2). Der Fehlerbalken gibt den Standardfehler (SE) wieder.

Alle weiteren Interaktionen (1., 2., 3. Ordnung) des Messwiederholungsfaktors werden nicht signifikant.

Ein weiterer Interaktionseffekt mit Trend zur Signifikanz ergibt sich für die Zwischensubjektfaktoren Interaktion und räumliche Intelligenz ($F_{(1,26)} = 3.771$, $p = .063$; vgl. Abb. 10). Während die Versuchsteilnehmer MRT_1 mit dem Rumblepad ($M = 314.18$, $SE = 44.67$) bessere Testleistungen als mit der Wii-Remote ($M = 400.20$, $SE = 45.49$) erzielen, schneiden die Probanden MRT_2 bei der Bearbeitung des virtuellen Basisszenarios mit dem Interaktionsgerät Rumblepad ($M = 280.19$, $SE = 44.67$) schlechter ab als mit der Wii-Remote ($M = 175.85$, $SE = 59.57$).

4.3.2 Sense of presence

Korrelation

Der Zusammenhang zwischen Präsenzbereitschaft und Präsenzerleben wurde statistisch über die Korrelation von *ITQ* und *PQ* für die einzelnen Anzeigesysteme analysiert. Die Korrelation wurde für

das desktopbasierte Projektionssystem nicht signifikant ($r = .052$, n. s.) Auch findet sich keine signifikante Korrelation für das Großprojektionssystem ($r = .163$, n. s.) und die stereoskopische Powerwallprojektion ($r = .193$, n. s.).

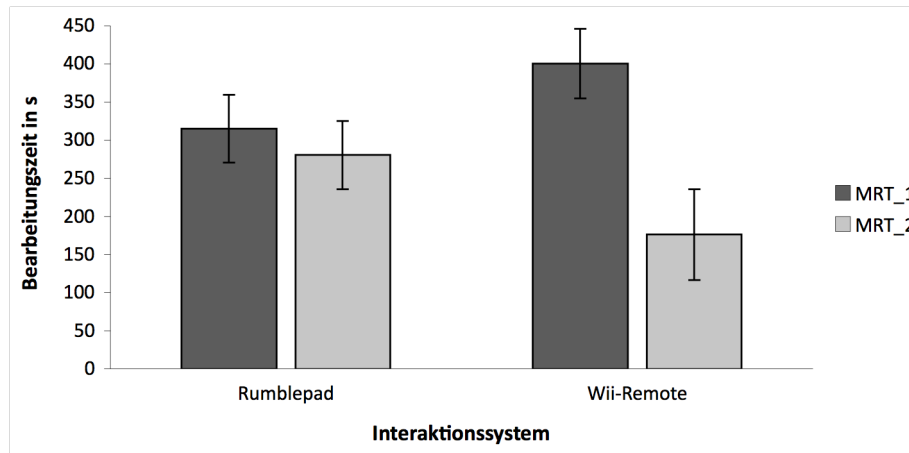


Abb. 10: Interaktionsdiagramm für die Bearbeitungszeit im virtuellen Basisszenario in Abhängigkeit der Faktoren Interaktion und räumliche Intelligenz. Der Fehlerbalken gibt den Standardfehler (SE) wieder.

Haupteffekte

Der Haupteffekt des Messwiederholungsfaktors Visualisierung wird signifikant ($F_{(2,60)} = 3.239$, $p = .046$), während die Zwischensubjektfaktoren Interaktion ($F_{(1,30)} = .007$, n. s.) und Geschlecht ($F_{(1,30)} = .000$, n. s.) das Präsenzerleben nicht signifikant beeinflussen.

Die für den Messwiederholungsfaktor durchgeführten *post-hoc* t-Tests zeigen, dass sich das Erleben von Präsenz hinsichtlich der Bedingungen Großprojektionssystem ($M = 94.16$, $SE = 2.04$) und stereoskopische Powerwallprojektion ($M = 89.06$, $SE = 1.97$) signifikant unterscheiden ($t_{(33)} = 2.793$, $p = .027$). Hingegen unterscheiden sich weder die Faktorstufen desktopbasiertes Projektionssystem ($M = 89.80$, $SE = 1.81$) und Großprojektionssystem ($t_{(33)} = 1.833$, n. s.) noch die stereoskopische Powerwallprojektion und desktopbasiertes Projektionssystem ($t_{(33)} = 0.331$, n. s.) signifikant voneinander (vgl. Abb. 11).

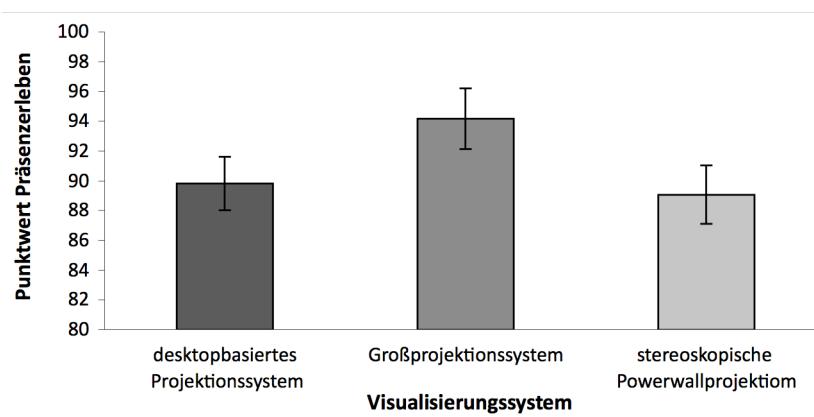


Abb. 11: Haupteffekt des Messwiederholungsfaktors Visualisierung. Dargestellt sind die aus der Selbsteinschätzung der Probanden resultierenden Punktwerte für das Präsenzerleben in Abhängigkeit vom Visualisierungssystem. Der Fehlerbalken gibt den Standardfehler (SE) wieder.

Interaktion

Es finden sich keine signifikanten Interaktionseffekte (1., 2. Ordnung).

4.3.3 Usability

Haupteffekte

Unter Berücksichtigung der Stufen des Messwiederholungsfaktors Visualisierung wird die *usability* für das Großprojektionssystem ($M = 136.59$, $SE = 3.74$) im Vergleich mit dem desktopbasierten Projektionssystem ($M = 133.54$, $SE = 4.42$) und der stereoskopische Powerwallprojektion ($M = 133.82$, $SE = 4.11$) besser eingeschätzt, wobei diese Unterschiede statistisch nicht signifikant sind ($F_{(2,60)} = .723$, n. s.). Weiterhin zeigen die Test der Zwischensubjekteffekte weder einen signifikanten Einfluss des Faktors Interaktion ($F_{(1,30)} = 7.852$, n. s.) noch des Geschlechts ($F_{(1,30)} = .873$, n. s.) auf die Bewertung der *usability*.

Interaktion

Es finden sich keine signifikanten Interaktionseffekte (1., 2. Ordnung).

4.3.4 Simulator sickness

Das Ergebnis der explorativen Datenanalyse zeigt, dass die mit der *simulator sickness* assoziierten Symptome für jede Faktorstufe des Messwiederholungsfaktors Visualisierung im Vergleich mit der Einschätzung der Versuchspersonen vor Antritt der experimentellen Untersuchung (prä_Test: $M = 12.43$, $SE = 2.75$) als weniger stark ausgeprägt bewertet werden (vgl. Abb. 12).

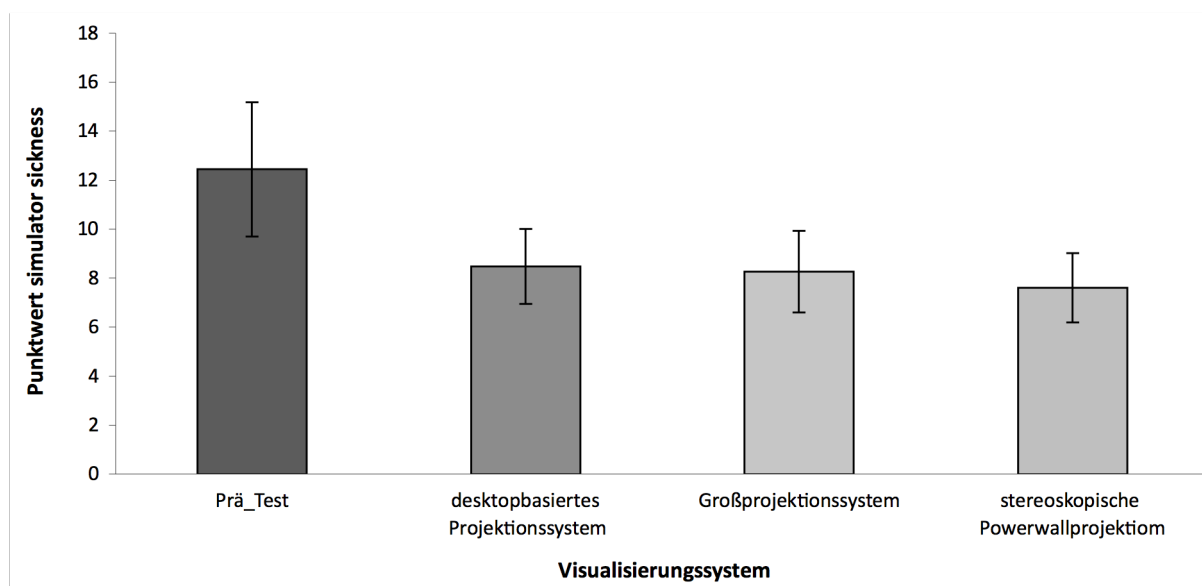


Abb. 12: Mittelwerte und Standardfehler (SE) für die auf der Selbsteinschätzung der Probanden beruhenden Gesamtwerte des SSQ. Vergleich des Punktwerts vor Beginn des experimentellen Settings (Prä_Test) und der Beurteilung für die einzelnen Visualisierungssysteme.

Dieses Ergebnis gilt sowohl für den Gesamtwert des SSQ als auch für die einzelnen Cluster, wie in Tabelle 3 dargestellt. Demnach wird auf eine weiterführende statistische Auswertung der abhängigen Variable *simulator sickness* (Hypothesen: H11, H13, H15) verzichtet.

Tab. 3: Mittelwerte der Symptomcluster der *simulator sickness* für Prä_Test und die Visualisierungssysteme. In Klammern sind die Standardabweichungen (SD) angegeben.

Symptomcluster	Visualisierung			
	Prä_Test	Desktopbasiertes Projektionssystem	Großprojektionssystem	Stereoskopische Powerwallprojektion
Nausea	8.14 (12.89)	6.73 (7.97)	5.33 (7.12)	5.89 (6.65)
Okulomotorik	13.82 (15.67)	9.59 (12.14)	8.92 (11.72)	9.14 (11.16)
Disorientierung	9.01 (18.42)	5.73 (9.76)	4.91 (7.57)	5.73 (9.14)

4.3.5 Zusammenhang zwischen abhängigen Variablen

Performanz und *sense of presence*

Die Korrelation der Variablen Performanz und *sense of presence* zeigt zwar für alle Anzeigesysteme den postulierten negativen linearen Zusammenhang (der Zusammenhang muss negativ sein, da die Bearbeitungszeiten besser sind, je schneller die Anwender die Aufgabe absolvieren), jedoch werden die Korrelationen nicht signifikant: desktopbasiertes Projektionssystem ($r = -.136$, n. s.); Großprojektionssystem ($r = -.063$, n. s.) und stereoskopische Powerwallprojektion ($r = -.096$, n. s.). Die Daten der Stichprobe sprechen gegen einen systematischen linearen Zusammenhang von Testleistung und Präsenzerleben.

Performanz und *usability*

Auch die Ergebnisse der Produkt-Moment-Korrelation von Performanz und *usability* dokumentieren den postulierten negativen linearen Zusammenhang zwischen den Messwertreihen, wobei auch hier die Korrelationen für keine Stufe des Messwiederholungsfaktors Visualisierung signifikant werden: desktopbasiertes Projektionssystem ($r = -.118$, n. s.); Großprojektionssystem ($r = -.147$, n. s.) und stereoskopische Powerwallprojektion ($r = -.222$, n. s.).

Demnach kann kein systematischer linearer Zusammenhang zwischen der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit und Performanz belegt werden.

Sense of presence und *usability*

Die korrelative Überprüfung der Kovariation der Messwertreihen *sense of presence* und *usability* belegt einen statistisch hochsignifikanten Zusammenhang für alle Anzeigesysteme: desktopbasiertes Projektionssystem ($r = .672$, $p < .001$), Großprojektionssystem ($r = .689$, $p < .001$); stereoskopische Powerwallprojektion ($r = .674$, $p < .001$). Es besteht folglich eine starke lineare Beziehung zwischen dem Präsenzerleben in der virtuellen Szenerie und der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit. Anhand der Berechnung des Determinationskoeffizienten (r^2) kann für das desktopbasierte Projektionssystem ($r^2 = .45$) 45% der Gesamtvarianz von *usability* durch das Präsenzerleben erklärt werden vice versa. Gleiches gilt entsprechend für das Großprojektionssystem ($r^2 = .48$) und die stereoskopische Powerwallprojektion ($r^2 = .45$).

5. Diskussion

Die vorliegende Pilotstudie nutzt ein varianzanalytisches Design zur Beantwortung der Frage, ob sich aus der spezifischen Kombination von Visualisierungssystemen und Interaktionstechniken, Unterschiede hinsichtlich der Performanz, des *sense of presence*, der *usability* und *simulator sickness* für spezifische VR-Applikation ergeben. Die Ergebnisse der Experimentierreihe liefern eine Reihe interessanter Gesichtspunkte, welche nachfolgend unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung des virtuellen Basisszenarios sowie der spezifischen Parameter der Anzeige- und Interaktionssysteme in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet und diskutiert werden.

5.1 Performanz

Für die Bearbeitungszeiten im virtuellen Basisszenario wurde gezeigt, dass die Probanden - im Vergleich mit den alternierenden Bedingungen - am Großprojektionssystem die besten Testleistungen erzielten, wohingegen sie am desktopbasierten Anzeigesystem am schwächsten abschnitten. Wenngleich sich die Bearbeitungszeiten zwischen stereoskopischer Powerwallprojektion und desktopbasierten Projektionssystem nicht signifikant unterscheiden⁶, kann insgesamt dennoch ein Vorteil der semi-immersiven Visualisierungssysteme gegenüber der desktopbasierten Displaytechnologie dokumentiert werden.

Vergleichbare Ergebnisse, die unter Berücksichtigung der Performanz einen Vorteil immersiver virtueller Umgebung nachweisen konnten, finden sich bei Slater, Linakis, Usoh & Kooper (1996) sowie Pausch, Shackelford & Proffitt (1993), wohingegen andere Studien diesen Zusammenhang nicht finden (Mizell, Jones, Jackson & Pickett, 1995; Slater, Alberto & Usoh, 1995). Auf der Suche nach einer Erklärung für die Heterogenität der Befunde empfiehlt sich eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Studien, welche einen entscheidenden Unterschied im Bereich der experimentellen Aufgabenstellung dekuviert. Im Vergleich zu den Untersuchungen von Mizell et al. (1995) und Slater et al. (1995) die sich auf Navigationsaufgaben in der virtuellen Szenerie beschränkten, interagierten die Versuchspersonen bei Slater et al. (1996) aktiv mit den Objekten der virtuellen Szenerie. Auch in der vorliegenden Studie waren die Versuchspersonen aufgefordert, mit den Objekten zu interagieren. Demnach spricht einiges dafür, dass der Zusammenhang von Immersion und Performanz von der Spezifität der Aufgabenstellung moderiert wird, insbesondere dem Grad der Interaktivität, welchen die virtuelle Szenerie eröffnet. Diese Vermutung ist umso interessanter, da neben der Immersion in der Interaktivität virtueller Umgebungen ein weiterer zentraler Faktor der *HCI* gesehen wird (vgl. Heckel, 1991; Laurel, 1990, 1991; Schneiderman, 1992). Um diese Annahme weiter zu verfolgen sowie den Zusammenhang von Immersion und Interaktivität besser zu verstehen, ist weitere Forschung notwendig. Das Augenmerk muss dabei auf den zentralen Facetten liegen (*speed*, *range* und *mapping*; vgl. Steuer, 1992), welche die Interaktivität kennzeichnen.

Neben dem Visualisierungssystem wurden auch unterschiedliche Testleistungen in Abhängigkeit des Interaktionsgerätes erwartet. Ein signifikanter Einfluss der Gamecontroller auf die Bearbeitungszeiten konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, wonach sich beide Interaktionstechniken in gleicher Weise zur Umsetzung der Aufgabenstellung eignen. Das Ausbleiben des Effektes ist womöglich darin begründet, dass sich die aus der Computerspieleindustrie stammenden Eingabegeräte einander zu ähnlich sind, obwohl mit Aufnahme der Wii-Remote mit Nunchuk auf eine möglichst hohe Divergenz

⁶ Aus statistischer Sichtweise ist die fehlende Signifikanz der kleinen Stichprobengröße geschuldet, die einer großen Streuung und einem zu geringen Mittelwertsunterschied der Bedingung gegenübersteht.

geachtet wurde. Während das Steuerungskonzept der überwiegenden Anzahl herkömmlicher Gamecontroller auf Tastenbelegungen und Analog-Sticks basiert, verfügt die Wii-Remote mit den Beschleunigungssensoren über eine dritte Dimension der Steuerung, die durch ihre Sensibilität für die Bewegung des Anwenders eine noch intuitivere Bedienung verspricht. Obwohl dieses Novum im Bereich der Bedienelemente auch zur Steuerung des virtuellen Basisszenarios implementiert wurde, resultieren daraus keine verbesserten Testleistungen, wohingegen gleichsam festzuhalten ist, dass die Probanden mit der Wii-Remote auch nicht schlechter abschneiden. Das virtuelle Basisszenario verlangt neben der Navigation in erster Linie die Manipulation visueller Objektattribute in Form der Positionsänderung (Translation) und Ausrichtungsänderung (Rotation), welche zu den basalen Interaktionsaufgaben in typischen VR-Umgebungen zählen. Möglicherweise können solche Aufgabenstellungen unter Einsatz eines *data glove* - der ebenfalls den klassischen Interaktionstechniken zuzurechnen ist (vgl. Bowman, Kruijff, LaViola & Poupirev, 2004) - effektiver und effizienter bearbeitet werden. Für diese Überlegung spricht die Konzeption des Datenhandschuhs, welche die primäre Funktion der Hand als Greifwerkzeug berücksichtigt (vgl. Kap. 2.2.2). Demnach entsprechen die Eingabebewegungen des *data glove* den natürlichen Handbewegungen, wie sie auch bei der Bearbeitung der Aufgabe in der Realität auszuführen sind. Unabhängig davon ist die Entwicklung intuitiver Steuerungskonzepte sicher der richtige Weg, der voller Chancen steckt, um die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu verbessern. Ein innovativer und viel versprechender Ansatz, um im Bereich der Computerspieleindustrie zu bleiben, ist beispielsweise das neue Interaktionsgerät ‚Move‘ von Sony, dessen Markteinführung für das Jahr 2010 geplant ist. Ebenso wie die Wii-Remote wird die ‚Move‘ über die Akzelerations-Technologie verfügen, wobei diese auch präzise Bewegungen im virtuellen dreidimensionalen Raum ermöglichen soll.

Neben dem Effekt des Anzeigesystems bestätigt die Datenlage auch den Einfluss des räumlichen Vorstellungsvermögens der Versuchspersonen. Die Ergebnisse zeigen, dass den Probanden mit einer starken Merkmalsausprägung im Bereich der räumlichen Intelligenz, die Bearbeitung des Basisszenarios signifikant schneller gelingt als den Versuchspersonen mit einer schwachen Ausprägung auf dem Faktor. Demnach beeinflussen die räumlichen-mental Fähigkeiten der Anwender die Leistungsfähigkeit im virtuellen Basisszenario, wobei dieser Zusammenhang bereits in einer Reihe früherer Studien nachgewiesen wurde (vgl. Bowman, 1999; Chen & Yu, 2000; Eyal & Tendick, 2001; McGee, 1979; Steele, Walder & Herbert, 1992). Mit Blick auf die Aufgabenstellung der Pilotstudie, welche vorrangig Positionsänderungen und Rotationsbewegungen im dreidimensionalen Raum verlangt, ist dieses Ergebnis wenig überraschend. Ein Vergleich der Items des virtuellen Basisszenarios mit dem 3DW (Gittler, 1990) lässt vermuten, dass die Bearbeitung des virtuellen Basisszenarios die gleichen kognitiven Fähigkeiten beansprucht, wie sie in Tests zur räumlichen Intelligenz gemessen werden.

Wenngleich nicht in jeder Studie ein Zusammenhang von Performanz und räumlicher Intelligenz aufgezeigt wird (vgl. Chen, 2000), so spricht doch vieles dafür, dass interindividuelle Unterschiede im räumlichen Denken bei der Entwicklung und Evaluation virtueller Szenarien sowohl im Hinblick auf die Interaktionstechniken als auch auf die Visualisierungssysteme zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus ist bei der Bewertung unterschiedlicher Leistungen in virtuellen Szenarien darauf zu achten, diese nicht per se den unterschiedlichen Eigenschaften der virtuellen Umgebung zuzuschreiben, sondern auch die Merkmale der Anwender bei der Interpretation zu berücksichtigen, wozu neben der räumlichen Intelligenz beispielsweise auch Alter, Geschlecht, Computererfahrung etc. gehören (vgl. Kap. 3.3.1.1). Besonders interessant ist der Einfluss des räumlichen Vorstellungsvermögens mit Blick auf die bislang als gesichert geltenden geschlechtsspezifischen Unterschiede (vgl. Linn & Peterson, 1985; Masters & Sanders, 1993), wenngleich die Größe der Differenzen zwischen Männern und Frauen in den letzten Jahren relativiert wurde (Quaiser-Pohl & Jordan, 2004, S. 15-22). Dennoch, insbe-

sondere unter Berücksichtigung des Einsatzes von VR zur Qualifizierung von Fachpersonal beiderseitigen Geschlechts ist es aus ethischer Perspektive nicht tragbar, das Raumverständnis unberücksichtigt zu lassen und damit eine mögliche systematische Benachteiligung der Anwender virtueller Szenarien in Kauf zu nehmen.

Die referierten Haupteffekte der Faktoren Visualisierung und räumliche Intelligenz sind an den Interaktionseffekten zu relativieren. Die Interaktion der Faktoren räumliche Intelligenz und Visualisierung zeigt, dass die Probanden, welche über ein stark ausgeprägtes Raumverständnis verfügen, zwar an allen Anzeigesystemen weniger Zeit für die Bearbeitung der Aufgaben benötigen, dieser Unterschied jedoch für die stereoskopische Powerwallprojektion im Vergleich mit dem desktopbasierten Projektionssystem und Großprojektionssystem nur marginal ausfällt. Weiterhin ist unter Berücksichtigung des räumlichen Vorstellungsvermögens ein gegenläufiger Trend der Bearbeitungszeiten zu erkennen. Während die Gruppe mit stark ausgeprägten räumlichen Vorstellungsvermögen am Großprojektionssystem die besten Testleistungen erzielt, bearbeiten die Versuchspersonen mit einem schwach ausgeprägten Raumverständnis an der stereoskopischen Powerwallprojektion am schnellsten.

Ein zweiter Interaktionseffekt ergibt sich für die Faktoren Interaktion und räumliche Intelligenz. Während die Probanden mit einem stark ausgeprägten räumlichen Vorstellungsvermögen mit der Wii-Remote im Vergleich zum Rumblepad bessere Testleistungen erzielen, bearbeiten die Versuchspersonen, deren Strukturen des räumlichen Denkens weniger stark ausgeprägt sind, das virtuelle Basiszenario unter Anwendung des Rumblepads. Eine Möglichkeit der Interpretation dieses Ergebnisses basiert auf den Steuerungskonzepten der Interaktionsgeräte. Während das Rumblepad auf konservativen Eingabemetaphern beruht, ist der Wii-Remote-Controller mit der neuartigen Akzelerations-Technologie ausgestattet (vgl. Kap. 3.3.2.2). Unter Berücksichtigung dieser technischen Parameter ist der Effekt etwas überraschend, da das innovative Bedienungskonzept der Wii-Remote, welches die natürlichen Bewegungen des Menschen zur Navigation und Manipulation in virtuellen Umgebungen unterstützt, *a-priori* eine intuitive Bearbeitung von Aufgaben in dreidimensionalen Kontexten verspricht. Dies sollte sich - im Vergleich mit konventionellen 2D-Eingabegeräte wie Mouse, Tastatur sowie Standard-Gamecontrollern - in einer generell besseren Performanz der Probanden widerspiegeln, wonach ein Haupteffekt des *between*-Faktors Interaktion zu erwarten war (H2), der jedoch nicht gefunden wurde.

Einen weiteren interessanter Erklärungsansatz des Interaktionseffekts fußt auf dem Konstrukt der „intuitiven Benutzung“, wonach ein technisches System im Rahmen einer Aufgabenstellung in dem Maße intuitiv bedienbar ist, in dem der jeweilige Benutzer durch unbewusste Anwendung von Vorwissen effektiv interagieren kann (vgl. Mohs, Hurtienne, Kindsmüller, Israel & Meyer, 2006; Mohs, Israel, Kindsmüller, Naumann & Hußlein, 2007). Demnach ist eine „intuitive Benutzung“ nicht Eigenschaft des Gerätes oder technischen Systems, sondern konzeptualisiert den Sachverhalt einer Mensch-Maschine-Interaktion, die sich an bereits bestehenden kognitiven Strukturen orientiert. Mohs et al. (2007) argumentieren weiter, dass sich eine „intuitive Benutzung“ in erster Linie dadurch auszeichnet, dass sie die Steuerung der Aufmerksamkeit beeinflusst, die als begrenzte menschliche Ressource bekannt ist. Wenn Aufmerksamkeit als die Konzentration der Wahrnehmung auf distinkte Stimuli der Umwelt verstanden wird (vgl. Waldenfels, 2006), dann dient ein intuitives Interface der Freisetzung von Aufmerksamkeitsressourcen, die nicht an die Interaktion mit dem technischen System gebunden sind und folglich auf die Bearbeitung der Aufgabe ausgerichtet werden können. Dieses effektive Interagieren und die damit verbundene Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf inhaltlich relevante Stimuli setzt jedoch per Definition die unbewusste Anwendung des Vorwissens der Nutzer voraus. Wenngleich die Autoren nicht explizieren, was sie im Detail unter bereits bestehenden Wis-

sensstrukturen verstehen, spielen beim Aufbau dieser Strukturen sicher auch jene Variablen eine wichtige Rolle, die in der vorliegenden Studie als Kontrollvariablen erhoben wurden (Affinität zu Computern, Erfahrung und der Umgang mit PC- und Konsolenspielen).

Unabhängig davon zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie, dass die intuitive Bedienung eines technischen Systems vermutlich nicht nur den bestehenden Wissensstrukturen unterliegt, sondern auch in Abhängigkeit weiterer kognitiver Konstrukte wie der räumlichen Intelligenz variieren können. Möglicherweise erleichtert ein ausgeprägtes räumliches Vorstellungsvermögen den Einstieg in das innovative Bedienungskonzept der Wii-Remote, insbesondere dann, wenn keine Unterschiede im Vorwissen bestehen, wozu neben den vorab angesprochenen Variablen auch die Erfahrung im Umgang mit der Wii-Remote selbst respektive auf vergleichbaren technologischen Merkmalen beruhenden Interaktionsmetaphern zählt. Der Vorteil eines stark ausgeprägten räumlichen Denkens könnte den Benutzer beispielsweise befähigen, die zur Navigation und Manipulation im virtuellen Basisszenario geforderten Auslenkungen der Wii-Remote schnell zu verinnerlichen, was den Probanden mit Schwächen im Raumverständnis weniger gut gelingt.

Letztere erzielen mit dem Rumblepad bessere Leistungen im virtuellen Basisszenario als mit der Wii-Remote. Das Rumblepad ist den konservativen Bedienelementen zuzurechnen, da es sich bekannter Bedienkonzepte wie Buttons und Analogsticks zur Interaktion bedient, welche auf Druck die entsprechenden Aktionen ausführen. Dieses Steuerungskonzept entspricht dem der konventionellen Maus und Tastatur, wonach das Rumblepad im Vergleich zur Wii-Remote für den Anwender die konfidente Alternative darstellt. Möglicherweise profitieren die Probanden mit einem schwach ausgeprägten Raumverständnis von der Vertrautheit dieser Interaktionsmetapher, was ihnen eine gewisse Sicherheit vermittelt und die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Bearbeitung des virtuellen Basisszenarios unterstützt.

Dieser Interpretationsansatz meint nicht, dass die innovative Technologie der Wii-Remote eine intuitive Benutzung nur im Rahmen stark ausgeprägter Strukturen des räumlichen Denkens gestattet. Vielmehr sprechen die Ergebnisse der vorliegenden Studie dafür, dass in Abhängigkeit der Struktur respektive des Aufbaus innovativer Bedienkonzepte, nur bedingt auf bereits bestehenden Wissensstrukturen zurückgegriffen werden kann und die Leistungen in VR auch in Abhängigkeit weiterer kognitiver Strukturen variieren, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Demgegenüber ist es durchaus denkbar, dass die Versuchspersonen mit weniger stark ausgeprägten Strukturen des räumlichen Denkens im Anschluss an eine Trainingsphase und dem daran gekoppelten Aufbau von Wissensstrukturen mit der Wii-Remote ebenso effektiv interagieren können wie ihre Pendants. Möglicherweise tritt der Einfluss des räumlichen Denkens bei gut ausgeprägten Vorwissensstrukturen in den Hintergrund. Dieser Vermutung ebenso wie dem vorgestellten Interpretationsansatz gilt es in weiteren Studien nachzugehen.

5.2 Sense of presence

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit hinsichtlich des Zusammenhangs von Immersion und Präsenzerleben sind nicht einheitlich. Während die Versuchspersonen das Präsenzerleben für das semi-immersive Großprojektionssystem am höchsten einschätzen, unterscheidet sich der *sense of presence* für die stereoskopische Powerwallprojektion und das non-immersive desktopbasierte Projektionssystem kaum voneinander.

Zur Interpretation dieses Resultates empfiehlt sich ein Rückblick auf das Kapitel 2.2.1, innerhalb dessen die Immersion als quantitative Beschreibung der eingesetzten Technologien eingeführt wurde,

welche im Bereich der Displaytechnologien u. a. durch Parameter wie *FoV*, Stereoskopie, Bildwiederholungsfrequenz, Auflösung etc. gekennzeichnet ist.

Unter Berücksichtigung dieser Parameter wurde der Versuchsaufbau für die stereoskopische Powerwallprojektion und das desktopbasierte Projektionssystem so gewählt, dass die Bedingungen mit Ausnahme der Stereoskopie möglichst identisch sind. Beide Anzeigesysteme projizierten das Stimulusmaterial auf einer Bildgröße von 1300 x 900 mm und mit einer Bildwiederholungsrate von 60 Hz. Der Abstand zwischen Projektionsfläche und Versuchsperson betrug jeweils 700 mm, wonach sich ein *FoV* von 75 Grad ergibt. Einzig die Auflösung konnte aufgrund technischer Beschränkungen nicht exakt abgestimmt werden (desktopbasiertes Projektionssystem: 1024 x 768 Pixel, stereoskopische Powerwallprojektion: 1400 x 1050 Pixel).

Dennoch, obwohl die stereoskopische Powerwallprojektion eine raumtreue Abbildung und höhere Auflösung bietet, berichten die Probanden im Vergleich zur desktopbasierten Visualisierung kein gesteigertes Präsenzerleben. Demgegenüber fühlen sich die Versuchspersonen in der medienvermittelten Umgebung im Vergleich zu den alternierenden Bedingungen signifikant präsenter, wenn sie am Großprojektionssystem arbeiten.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass sich die Unterschiede nicht mit dem Effekt der Tiefenwahrnehmung begründen lassen, da diesen Eindruck sowohl das Großprojektionssystem als auch die Powerwallprojektion erzeugen können, sich jedoch letztere Bedingung hinsichtlich des Präsenzerlebens nicht von der desktopbasierten Visualisierung abhebt. Insbesondere der Vorteil einer stereoskopischen Präsentation auf das Erleben von Präsenz, wie er beispielsweise bei Hendrix & Barfield (1996), IJsselsteijn, de Ridder, Hamberg, Bouwhuis & Freeman (1998) oder Freeman, Avons, Pearson & IJsselsteijn (1999) gefunden wurde, kann in der vorliegenden Untersuchung nicht belegt werden.

Da auch das Großprojektionssystem mit einer Bildwiederholungsrate von 60 Hz projiziert und die Gesamtauflösung von 4000 x 1000 Pixel in Relation zur Projektionsfläche qualitativ nicht über jener der alternativen Bedingung liegt, ist das erhöhte Gefühl des *being there* vermutlich an die Größe der Projektionsfläche sowie des damit in Verbindung stehenden *FoV* gebunden, das in Abhängigkeit der Kameraperspektive zwischen 150 - 180 Grad variierte (vgl. Kap. 3.3.3.1). Die Frage, ob sich das Präsenzerleben im virtuellen Basisszenario in Abhängigkeit des *FoV* oder der Gesamtprojektionsfläche verändert, kann in weiteren Studien thematisiert werden. Um beispielsweise den Einfluss der Displaygröße zu untersuchen, müssten die Distanzen zwischen Anwender und Projektionsfläche in Abhängigkeit der Displaygröße angepasst werden, wonach das *FoV* der Anwender bei der Bearbeitung der Aufgaben konstant bleibt. Alternativ könnte die Distanz zwischen User und Anzeigesystem auch bei einer fixen Größe der Displaytechnologie variiert werden, woraus sich ein wechselndes *FoV* ergäbe, dessen Wirkung dann auf die Leistungen und das Präsenzerleben untersucht werden kann.

Wie bereits betont, erlaubt das varianzanalytische Design keine abschließende Klärung dieser Fragestellungen. Dessen ungeachtet finden sich in der Literatur eine Reihe von Studien, die sowohl auf einen vergleichbaren Zusammenhang von *FoV* und *sense of presence* (IJsselsteijn, de Ridder, Freeman, Avons & Bouwhuis, 2001; Lin, Duh, Abi-Rached, Parker & Iii, 2002; Prothero & Hoffman, 1995) als auch der Displaygröße und Präsenzerleben (vgl. Tan, Gergle, Scupelli & Pausch, 2003) verweisen.

5.3 Performanz und sense of presence

Ausgehend von theoretischen Überlegungen wird zumeist eine direkte Beziehung von Präsenzerleben und Performanz in virtuellen Umgebungen angenommen, wonach das Potential virtueller Um-

gebungen häufig am Präsenzerleben bemessen wird, welches aus dem Immersionsgrad des jeweiligen Anzeigesystem resultiert (vgl. Sheridan, 1992; Zeltzer, 1992). Demgegenüber ist die Beziehung der Variablen nur vergleichsweise selten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen, wobei die Ergebnisse sehr heterogen ausfallen (vgl. Nash et al., 2000; Schuemie et al., 2001). Während in einigen Studien mit unterschiedlichen Aufgabenstellungen die postulierte positive Beziehung von Präsenzerleben und Performanz gefunden wurde (Ellis, Dorigi, Menges, Adelstein & Jacoby, 1997; Pausch, Proffitt & Williams, 1997; Singer, Allen, McDonald & Gildea, 1997), konnte in anderen Arbeiten der Zusammenhang nicht belegt werden (Bailey & Witmer, 1994; Singer, Ehrlich, Cinq-Mars & Papin, 1995). Vergleichbar mit den letztgenannten Befunden können auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie die gängige Vorstellung nicht stützen, da sich für keines der Anzeigesysteme ein linearer Zusammenhang der Messwertreihen Testleistung und *sense of presence* ergab, was gegen einen substantiellen Zusammenhang der Variablen spricht.

Trotz der uneinheitlichen Befundlage ist die Annahme einer positiven Beziehung von Präsenzerleben und Performanz stark verfestigt. Häufig wird sogar eine kausale Beziehung angenommen, wonach die Leistung in virtuellen Umgebungen in Abhängigkeit des Präsenzerlebens variieren. Die Gründe für diese Auffassungen vermuten Stanney et al. (1998, p. 164) in der hohen Augenscheinvalidität des Zusammenhanges, wobei unberücksichtigt bleibt, dass es sich beim *sense of presence* auch um ein Epiphänomen handeln kann (Welch et al., 1996). Weiterhin ist es möglich, dass das Erleben von Präsenz in keinem kausalen Zusammenhang zur Performanz steht, sondern beide Variablen von Drittvariablen beeinflusst werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bislang mehr Fragen zur Beziehung von Performanz und Präsenzerleben offen als beantwortet sind. Weiterhin sind valide Aussagen zum Zusammenhang von *sense of presence* und Testleistungen in VR derzeit nicht möglich, da die Ergebnisse der bislang publizierten Arbeiten - wie auch der vorliegenden Studie - zumeist auf korrelativen Zusammenhangsmaßen beruhen.

Um den Zusammenhang zwischen Präsenzerleben und Performanz besser zu verstehen, müssen zukünftige Untersuchungen die Abhängigkeiten der Variablen - auch unter Berücksichtigung von Drittvariablen - in den Mittelpunkt rücken. Die Schwierigkeit dieser Aufgabe wird mit Blick auf die experimentellen Designs transparent, welche solche Fragestellungen erfordern. Diese müssen es erlauben, das Präsenzerleben zu manipulieren ohne gleichzeitig die Performanz in virtuellen Umgebungen zu beeinflussen. Nichtsdestoweniger gilt es Antworten zu finden, die aus wissenschaftlicher Sichtweise nicht nur zu einem generell verbesserten Verständnis der VR beitragen, sondern darüber hinaus auch Aufschluss geben, ob und/oder inwiefern bei der Entwicklung virtueller Umgebungen eine Maximierung des *being there* anzustreben ist.

Wie zentral diese Fragen sind, verdeutlicht der Blick auf den Einsatz von VR in der Aus- und Weiterbildung, da Performanz und Leistungsfähigkeit in diesem Kontext gleichbedeutend mit Lernergebnis und Wissenszuwachs ist. Unter Berücksichtigung der Anschaffungskosten sind die Unternehmen - beispielsweise im Vergleich zur Unterhaltungsindustrie - sicher nicht daran interessiert, den Auszubildenden ein möglichst hohes Gefühl der illusionären Unmittelbarkeit zu vermitteln, wenn sich dieses nicht auch gleichzeitig in überlegenden Lernleistungen widerspiegelt, die ohne *sense of presence* nicht erzielt werden.

Die aktuelle Lage der Befunde, welche zum Teil sogar negative kausale Zusammenhänge aufzeigen (Ellis, 1996), spricht jedoch nicht dafür, bei der Entwicklung virtueller Umgebungen in erster Linie eine Maximierung des Präsenzerlebens zu verfolgen (vgl. auch Welch, 1997).

5.4 Usability

Mit der *usability* wurde in Kap. 2.3.2 ein weiteres Konstrukt eingeführt, dem eine wichtige Bedeutung im Kontext der VR beigemessen wird. Vergleichbar mit dem *sense of presence* soll die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit, was zumeist in einem iterativen Prozess geschieht, den Entwicklern helfen, Probleme zu erkennen und die zugrunde liegenden Prozesse zu verstehen, um zu einer Verbesserung des Produktes beizutragen.

In der vorliegenden Studie unterscheidet sich die Einschätzung der *usability* durch die Versuchspersonen weder in Abhängigkeit der Visualisierungssysteme, der Interaktionsgeräte noch des Geschlechts. Dieses Ergebnis überrascht insofern, da die Autoren - basierend auf theoretischen Vorüberlegungen - vermuteten, dass die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit in Abhängigkeit der eingesetzten Interaktionstechniken (H7) und Visualisierungsumgebungen (H6) differieren. Dennoch, ein Vergleich der deskriptiven Ergebnisse für die Anzeigesysteme zeigt, dass sich für die Bedingungen des Faktors zumindest die gleiche Tendenz findet, wie beim Präsenzerleben, wenngleich die Mittelwertsunterschiede hier keine Signifikanz erreichen⁷.

5.5 Performanz und usability

Darüber hinaus überrascht der fehlende lineare Zusammenhang zwischen den Testleistungen im Basisszenario und der Einschätzung der *usability*, da die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit mit den Parametern Effektivität und Effizienz auf Attributen fußt, welche ein engen Zusammenhang zur Leistungsfähigkeit des Anwenders in medialen Kontexten nahe legen. Auf Grund dessen ist es Ziel der *usability*-Forschung, die Schwachstellen im Bereich der *HCI* aufzudecken und die Nutzbarkeit des Systems zu verbessern, was letztlich in einer verbesserten Handhabbarkeit des Mediums münden soll. Demnach müsste sich auch im virtuellen Basisszenario eine weniger gut eingeschätzte *usability* in längeren Bearbeitungszeiten ausdrücken *vice versa*. Das Ausbleiben des linearen Zusammenhanges von Gebrauchstauglichkeit und Performanz kann möglicherweise unter Betrachtung der Anwender sowie des Typus der Arbeitsaufgaben erklärt werden, zwei der zentralen Faktoren, die Einfluss auf die Messung der *usability* nehmen können.

Auf Seiten des Anwenders kann der fehlende Zusammenhang der Kontrollüberzeugung geschuldet sein, welche die Art und Weise beschreibt, wie sich Individuen die Ergebnisse des eigenen Handelns erklären (vgl. Heckhausen, 1980; Rotter, 1966; Weiner, 1974). Die Kontrollüberzeugung gibt an, inwiefern die Ergebnisse unseres Handelns davon abhängen, was wir selbst tun (interner *locus of control*) oder auf Ereignissen beruhen, die außerhalb unserer persönlichen Kontrolle liegen (externer *locus of control*). Das Konzept der Kontrollüberzeugung ähnelt sehr dem Phänomen, welches Norman (1989) im Kontext des Umganges mit multimedialen Lernangeboten als Tendenz zur Selbstschuld beschreibt. Demnach ist es möglich, dass die Anwender virtueller Umgebungen das Auftreten von Problemen bei der Interaktion nicht auf die Gestaltung des User-Interfaces zurückführen, sondern die Schwachstelle in der eigenen Leistungsfähigkeit sehen. Diese internale Attribution kann demnach Grundlage für eine von den erzielten Leistungen unabhängige Bewertung der Gebrauchstauglichkeit sein.

Neben der Kontrollüberzeugung birgt die Erhebung der *usability* mittels Nachbefragung noch weitere Probleme wie sozial erwünschter Antworten oder Verzerrungen in Form selektiver sowie interpretierter Erinnerung (vgl. Nielsen, 2001).

⁷ vgl. S. 39, Fußnote 6.

Ein zweiter Erklärungsansatz ergibt sich aus dem Informationsgehalt des virtuellen Basisszenarios, welches den Probanden nicht die Möglichkeit eröffnet, die eigenen Bearbeitungszeiten unter Berücksichtigung der Leistungen anderer Anwender einordnen zu können. Zwar waren die Versuchspersonen ausdrücklich aufgefordert, das virtuelle Basisszenario so schnell und korrekt wie möglich zu bearbeiten (vgl. Kap. 3.2), jedoch fehlen zur Beurteilung der *usability* möglicherweise Referenzwerte, welche noch angemessenere Einschätzungen erlauben.

Ein Beispiel soll die Argumentation verdeutlichen: Benötigt eine Versuchsperson mit einer Bearbeitungszeit von 500 ms vergleichsweise viel Zeit für die Bewältigung der Aufgabenstellung, kann das subjektive Empfinden per se sowohl für eine hohe als auch niedrige Gebrauchstauglichkeit der *HCI* sprechen. Erhält der Proband hingegen ein Feedback über die in der virtuellen Szenerie erbrachten Leistungen anderer Teilnehmer, ist er vermutlich eher in der Lage zu beurteilen, ob die Kombination aus Interaktionsgerät und Anzeigesystem ein derart effektives und effizientes Arbeiten erlaubt. Solche Referenzwerte könnten beispielsweise durch die Darbietung einer ‚Highscore‘ realisiert werden, wobei auch an dieser Stelle das vorab eingeführte Konstrukt der Kontrollüberzeugung eine wichtige Rolle spielen kann.

Ein weiterer Interpretationsansatz zur Erklärung des fehlenden Zusammenhanges von Performanz und Bewertung der Gebrauchstauglichkeit resultiert aus der inhaltlichen Betrachtung des virtuellen Basisszenarios. Das „Verschieben von Würfeln in Würfel“, wie die Aufgabe der Pilotstudie von einem der Teilnehmenden umrissen wurde, hat möglicherweise für die Anwender einen eher spielerischen Charakter. Demnach ist denkbar, dass das virtuelle Basisszenario nicht die notwendige inhaltliche Valenz aufweist, die notwendig ist, um die Nützlichkeit des User-Interfaces in Relation zur eigenen Performanz zu beurteilen.

5.6 Usability und sense of presence

Während sich weder ein Zusammenhang der *usability* noch des *sense of presence* mit objektiven Leistungskriterien findet, lässt sich ein hochsignifikanter linearer Zusammenhang der subjektiven Selbsteinschätzungen zur Gebrauchstauglichkeit des User-Interfaces und des Präsenzerlebens aufzeigen. Zwar erlaubt das korrelative Design auch hier keine Aussagen über die Kausalität der Beziehung, jedoch ist unter theoretischen Gesichtspunkten - mit Blick auf die jeweiligen Kernaspekte der Konstrukte - sowohl ein bedingter Einfluss der *usability* auf das Präsenzerleben als auch die Wirkung des *sense of presence* auf die Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit denkbar.

Demnach könnte beispielsweise eine ausgeprägte Zufriedenheit des Nutzers mit der Anwendung dazu führen, dass der Fokus der Aufmerksamkeit auf die Inhalte der virtuellen Umgebung ausgerichtet wird, was die Auftretenswahrscheinlichkeit des *being there* erhöht. Weiterhin ist denkbar, dass sich die effektive und effiziente Aufgabenbearbeitung in einem gesteigerten Selbstwirksamkeitserleben niederschlägt (vgl. Bandura, 1997), d. h. in der Erwartung, aufgrund eigener Kompetenzen die gewünschten Handlungen erfolgreich selbst ausführen zu können.

Dies ist insofern interessant, da Selbstwirksamkeit häufig in Situationen erlebt wird, die durch Übereinstimmung von situativen Handlungsanforderungen und Fähigkeiten des Anwenders gekennzeichnet sind, ein Aspekt, der auch innerhalb des *Flow*-Erlebens (engl.: *flow* = fließen) eine zentrale Rolle spielt (vgl. Csikszentmihalyi 1995, S. 284). Der *Flow* kennzeichnet als Pendant zur Entropie einen Zustand der Ordnung, innerhalb dessen Raum und Zeit vergessen werden. Darüber hinaus erfolgt ein Verschmelzen mit der Aufgabe, was letztlich in einem besonders positiven Bewusstseinszustand

mündet. Die Relevanz autotelischer Tätigkeiten im Kontext von VR wird unter Berücksichtigung der Voraussetzungen für das Erleben von Präsenz deutlich. Soll die virtuelle Umgebung als unmittelbar wahrgenommen werden, muss das Medium für den Anwender subjektiv verschwinden, was nicht zuletzt an das Ausblenden der Distraktoren aus der Realität gebunden ist (vgl. Kap. 2.3.1). Ein hohes Maß an *usability* könnte - neben anderen Variablen - eine solche Passung von Fähigkeit und Anforderungsniveau lancieren und damit eine wichtige Voraussetzung für die Autotelie schaffen, was sich letztlich in einem intensiveren Präsenzerleben äußern kann (vgl. auch Takalato, 2002).

Wie kann sich das Präsenzerleben auf die *usability* auswirken? Möglicherweise vereinfacht ein ausgeprägtes Gefühl des *being there* die Wahrnehmung interaktiver Objekte in direkter Relation zur eigenen Position. Damit könnte es dem Anwender leichter fallen, die Distanzen, Größen und Interaktionsmöglichkeiten in der virtuellen Szenerie zu bewerten. Fühlt sich der Anwender hingegen nicht oder weniger präsent, ist die Bewertung der vorbenannten Parameter an eine Rekonstruktion der räumlichen Anordnung geknüpft. Dieser Prozess bindet möglicherweise kognitive Ressourcen, die sonst der effektiven und effizienten Bearbeitung der Aufgabenstellung zur Verfügung stünden.

5.7 Simulator sickness

Wie in Kap. 4.3.4 dargestellt, rief die Bearbeitung des virtuellen Basisszenarios bei keinem der eingesetzten Anzeigesysteme die charakteristischen visuellen und vestibulären Begleiterscheinungen hervor, welche in ihrem Zusammenspiel die Symptomatik der *simulator sickness* kennzeichnen. Was auf den ersten Blick verwundert, ist jedoch unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung des Basisszenarios sowie der perspektivischen Sicht respektive des Bezugssystems der Versuchspersonen zu erklären. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Bezugssysteme, wobei die Mehrheit der egozentrischen oder exozentrischen Sichtweise des Anwenders zugeordnet werden kann. Die egozentrische Perspektive nimmt der Nutzer ein, wenn es sich innerhalb der virtuellen Szenerie befindet, wohingegen der Anwender beim exozentrischen Bezugssystem die virtuelle Umgebung aus der Distanz wahrnimmt (vgl. Salzmann, Dede & Loftin, 1999).

In der vorliegenden Studie beschränkt sich das Bezugssystem der Anwender auf die exozentrische Perspektive. Darüber hinaus beinhaltet das virtuelle Basisszenario weder eine Vielzahl graphischer Details noch ändert sich der Hintergrund der Szenerie in Abhängigkeit der Positionsänderung der Objekte oder der Eigenbewegungen des Anwenders, wie es beim Einsatz von *Tracking*-Verfahren möglich ist. Lediglich die Veränderung der Kameraperspektive bewirkt eine Veränderung des Hintergrundes, wobei die veränderte Perspektive bewusst durch den Nutzer herbeigeführt wird. Demnach entsprechen die Veränderungen in der virtuellen Umgebung der Erwartung des Nutzers, wonach die Gefahr eines *mismatch* zwischen medienvermittelter Stimulation der Wahrnehmungsorgane und Propriozeption im Sinne der *sensory-conflict*-Theorie nicht unmittelbar gegeben ist. Warum sich die Probanden im Laufe der experimentellen Untersuchung sogar besser als im Vorfeld der Testung fühlten, bleibt spekulativ.

5.8 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit belegt, dass sich das varianzanalytische Design mit Messwiederholung zur vergleichenden Untersuchung verschiedener Anzeigesysteme und Interaktionstechniken eignet. Darüber hinaus eröffnet das forschungsmethodische Instrument die Aufnahme weiterer Variablen, von

denen ein Einfluss auf Performanz, *sense of presence*, *usability* sowie auf weitere abhängige Variablen im Kontext virtueller Umgebungen zu erwarten ist.

Weiterhin sind die Reliabilitäten der Fragebögen als zufrieden stellend und gut einzuordnen, wonach sich der Einsatz der Instrumente empfiehlt, wenngleich umfassende Studien zur Validität noch ausstehen.

In toto zeigen die Ergebnisse der Pilotstudie, dass das experimentelle Design mit seinen Freiheitsgraden auch im Bereich virtueller Qualifizierungsmaßnahmen - unter Berücksichtigung von Lernergebnissen, Wissenszuwachs sowie Präsenzerleben, Zufriedenheit und Akzeptanz der Anwender - einen wichtigen Beitrag zur Bewertung des Einsatz verschiedener technologischer Parameter leisten kann. In einem nächsten Schritt wird das entwickelte methodische Setting in die Anwendungsbereiche transferiert, wo es zur Weiterentwicklung sowie Validierung der erarbeiteten VR-Systementwicklungen eingesetzt wird.

Demgegenüber verdeutlicht die vorliegende Studie auch, dass hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen den abhängigen Variablen Performanz, *sense of presence* und *usability*, noch immer von einem beginnenden Verständnis zu reden ist. Die Ergebnisse der Untersuchung reihen sich dabei in das heterogene Gesamtbild ein und die Interpretationsansätze verdeutlichen in erster Linie, dass ein fundiertes Verständnis eine Vielzahl weiterer Arbeiten sowohl theoretischer als auch empirischer Natur bedingt.

5. Literatur

- Amemiya, T., Ando, H., & Maeda, T. (2005). Virtual Force Display: Direction Guidance using Asymmetric Acceleration via Periodic Translational Motion. *Proc. of ICAT 2005*, 201-208.
- Axelsson, A.-S. (2002). The digital divide: Status differences in virtual environments. In R. Schroeder (Ed.), *The social life of avatars: Presence and interaction in shared virtual environments* (pp. 188-204). London: Springer.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. (2008). *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin: Springer
- Badique, E., Cavazza, M., Klinker, G., Mair, G., Sweeney, T., Thalmann, D., & Thalmann N. M. (2002). Entertainment applications of virtual environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments* (pp. 1143–1166). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bailey, J., & Witmer, B. (1994). Learning and transfer of spatial knowledge in a virtual environment. *Proceedings of the Human Factor and Ergonomics Society 38th Annual Meetings* (pp. 1158-1162). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Balakrishnan, R. Fitzmaurice, G. Kurtenbach, G., & Buxton, W. (1999). Digital Tape Drawing. In *Proceedings of the 12th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, CHI Letters*, 1(1), 161-169.
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. New York: Freeman.
- Barfield, W., & Hendrix, C. (1995). The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, 1, 3-16.
- Barfield, W., & Weghorst, S. (1993). The Sense of Presence Within Virtual Environments: A Conceptual Framework. In G. Salvendy, & M. Smith (Eds.), *Human-Computer Interaction: Proceedings of 5th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 1993)* (pp. 699-704). Orlando, Florida, 08.-13. August. Amsterdam: Elsevier.
- Bente, G., Krämer, N., & Petersen, A. (2002). *Virtuelle Realitäten*. Göttingen: Hogrefe.
- Bevan, N., Kirakowski, J., & Maisel, J. (1991). What is Usability? In H.-J. Bullinger (Ed.), *Human Aspects in Computing: Design and Use of Interactive Systems and Work with Terminals* (pp. 651–655). Amsterdam, London, New York: Elsevier.
- Biocca, F. (1992). Communication within virtual reality: Creating a space for research. *Journal of Communication*, 42(4), 5-22.
- Biocca, F., & Delaney, B. (1995). The vision of virtual reality. In F. Biocca, & M. Levy (Eds.), *Communication in the age of virtual reality* (pp. 57-126). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bischof, N. (1966). Stellungs-, Spannungs- und Lagewahrnehmung. In W. Metzger, & H. Erke (Hrsg.), *Wahrnehmung und Bewußtsein. Handbuch der Psychologie. 1. Band: Allgemeine Psychologie* (S. 409-497). Göttingen: Hogrefe.
- Blascovich, J. (2002). Social influence within immersive virtual environments. In R. Schroeder (Ed.), *The social life of avatars: Presence and interaction in shared virtual environments* (pp. 127-145). London: Springer.
- Bles, W., Bos, J. E., & Kruit, H. (2000). Motion sickness. *Current opinion in neurology*, 13, 19-25.
- Bowman, D. A. (1996). Conceptual Design Space: Beyond Walk-through to Immersive Design. In D. Bertol (Ed.), *Designing Digital Space* (pp. 225- 236). New York: John Wiley & Sons.
- Bowman, D. A. (1999). *Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments: Design, Evaluation, and Application*. Ph.D. thesis. Virginia: Polytechnic & State University.
- Bormann, S. (1994). *Virtuelle Realität. Genese und Evaluation*. Bonn: Addison-Wesley.

- Brooks, F., Airey, J., Alspaugh, J., & Bell, A. (1992). Final Technical Report: Walkthrough Project. *Report to National Science Foundation*.
- Bruß, D. (2003). *Quanteninformation*. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag.
- Buchholz, T. & Kutrib, M. (1998). Molekulare Computer. Rechnen im Reagenzglas. In *Spiegel der Forschung*, 15(1), Heft 1, 27–36.
- Bullinger, H.-J. & Warnecke, H.-J. (1994). *Virtual Reality '94*. Berlin: Springer.
- Bullinger, H.-J., Bauer, W., & Braun, M. (1997). Virtual environments. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors and ergonomics* (pp. 1725-1758). New York: Wiley.
- Burdea, G. (1996). *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. New York: Wiley.
- Burdea, G., Langrana, N., Roskos, E., Silver, D., & Zhuang, J. (1992). A portable dexterous master with force-feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 18-28.
- Buxton, B., & Fitzmaurice, G. W. (1998). HMDs, caves & chameleon: a human-centric analysis of interaction in virtual space. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 32(4), 69-74.
- Card, S., Moran, T. P., & Newell, A. (1990). The Keystroke-Level Model for User Performance Time with Interactive Systems. In J. Preece, L. Keller, & H. Stolk (Eds.), *Human-computer interaction: Selected Readings*. Cambridge: Cambridge Press.
- Chen, C. (2000). Individual differences in a spatial-semantic virtual environment. *Journal of the American Society For Information Science*, 51, 529-542.
- Chen, C., & Yu, Y. (2000). Empirical studies of information visualization: a meta-analysis. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53, 851-866.
- Cherny, L. (1994). Gender Differences in Text-Based Virtual Reality. *Proceedings of the Third Berkeley Women and Language Conference*.
- Cobb, S. V. G, Nichols, S., Ramsey, A., & Wilson, J. R. (1999). Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 169-186.
- Crellin, J., Horn, T., & Preece, J. (1990). Evaluating Evaluation: A Case Study of the Use of Novel and Conventional Evaluation Techniques in a Small Company. In D. e. a. Diaper (Ed.), *Human - Computer Interaction – Interact '90* (pp. 329–335). Amsterdam: Elsevier Science.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16, 297-334.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R., & Hart, J. C. (1992). The CAVE audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64-72.
- Cutmore, T. R. H., T. J. Hine, K. J. Maberly, N. M. Langford, & G. Hawgood (2000). Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(2), 223-249.
- Csikszentmihalyi, Mihaly (1995): *Flow. Das Geheimnis des Glücks*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- DIN-EN-ISO9241-11 (1996). *International Organization for Standardization: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil II: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit – Leitsätze (ISO/DIS 9241-11:1997)*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth-Verlag.
- DiZio, P., & Lackner, J. R. (1992). Spatial Orientation, Adaption and Motion Sickness in Real and Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(1), 319-328.
- Dumas, J. S., & Redish, J. C. (1999). *A practical guide to usability testing*. Hassalo, St. Portland: Intellect Books.
- Ellis, S. R. (1996). Presence of mind: A reaction to Sheridan's musings on telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(2), 247-259.
- Ellis, S. R., Dorigi, N. S., Menges, B. M., Adelstein, B. D., & Jacoby, R. H. (1997). In search of equivalence classes in subjective scales of reality. In: M. J. Smith, G. Salvendy, & R. J. Koubek (Eds.),

- Design of Computing Systems: Social and Ergonomic Considerations* (pp. 873-876). Amsterdam: Elsevier.
- Eyal R., & Tendick F. (2001). Spatial ability and learning the use of an angled laparoscope in a virtual environment. *Stud Health Technol Inform*, 81, 146–52.
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., & Tutz, G. (2007). *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*. Berlin: Springer.
- Freeman, J., Avons, S. E., Pearson, D. E., & IJsselsteijn, W. A. (1999). Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8, 1–13.
- Fröhlich, B., & Plate J. (2000). The Cubic Mouse: A new Device for Three-Dimensional Input. *CHI Letters*, 2(1), 526-531.
- Gabbard, J., & Hix, D. (1998). Usability Engineering for Virtual Environments through a Taxonomy of Usability Characteristics. Submitted to *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*.
- Galley, N. (2001). Psychologische Grundlagen, Meßmethoden und Indikatorfunktionen der oklumotorischen Aktivität. In F. Rösler (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Biologische Grundlagen (Vol. Grundlagen und Methoden der Psychophysiologie)* (S. 237–316). Göttingen: Hogrefe.
- Gardner, M. (1986). *Bacons Geheimnis*. Frankfurt am Main: Krüger.
- Garau, M., Friedman, Widenfeld, H. R., Antley, A., Brogni, A., & Slater, M. (2008). Temporal and Spatial Variations in Presence: Qualitative Analysis of Interviews from an Experiment on Breaks in Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 17(3), 293-309.
- Geiser G. (1990). *Mensch-Maschine-Kommunikation*. München, Wien: Oldenbourg.
- Gittler, G. (1990). *Dreidimensionaler Würfeltest (3DW)*. Weinheim: Beltz.
- Gooch, R. E. (1995). Space and Spaceball. *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV, ASP Conference Series*, 77, 144-147.
- Goldstein, E. B. (2003). *Sensation and perception*, 6. ed. Heidelberg: Spektrum.
- Grimsdale, C. (1992). Virtual Reality - key technologies, problems and emerging solutions. In T. Feldman (Ed.), *Virtual Reality International 92: Impacts and Applications* (pp. 14-22). London: Information Today.
- Guiard, Y (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model. *The Journal of Motor Behavior*, 19(4), 486-517.
- Hannafin, J. M., & Peck, K. L. (1988). *The Design, Development and Evaluation of Instructional Software*. New York: Mac-Millan Publishing Company.
- Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonistischer und pragmatischer Qualität. In G. Szwillus (Hrsg.), *Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung* (S. 187–196). Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner.
- Hayes, R. M. (1989). *3-D Movies: A History and Filmography of Stereoscopic Cinema*. London: McFarland.
- Havron, M. D., & Butler, L. F. (1957). Evaluation of Training Effectiveness of the 2FH2 Helicopter Flight trainer Research Tool. *Technical Report NAVTRADEBCEN 1915-00-1*. Port Washington, NY: Naval Training Device Center.
- Heckel, P. (1991). *The elements of friendly software design*. Alameda, CA: SYBEX.
- Heckhausen, H. (1980). *Motivation und Handeln*. Berlin: Springer
- Heeter, C. (1992). Being There: The Subjective Experience of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2), 262-271.
- Held, R.M., & Durlach, N.I. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 109-112.

- Hendrix, C., & Barfield, W. (1996). Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 274-289.
- Henning, A. (1997). *Die andere Wirklichkeit: Virtual Reality - Konzepte, Standards, Lösungen*. Bonn: Addison Wesley.
- Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., & Benford, S. (2001). Virtually missing the point: Configuring CVEs for object-focused interaction. In E. F. Churchill, D. N. Snowdon, & A. J. Munro (Eds.), *Collaborative virtual environments: Digital places and spaces for interaction* (pp. 115-139). London: Springer.
- Hirzinger, G., Albu-Schäffer, A., Hähnle, M., Schaefer, I., & Sporer, N. (2001). On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots. *ICRA 2001: International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26*, 3356-3363.
- Hirzinger, G., & Gombert, B. (1999). Die SpaceMouse bei der CAD-Arbeit. *F & M Feinwerktechnik Mikrorotechnik Mikroelektronik*, 107(3), 64-65.
- Hodges, L. F. (1992). Tutorial: Time-Multiplexed Stereoscopic Computer Graphics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12(2), 20-30.
- Hodges, L., Rothbaum, B., Kooper, R., Opdyke, D., Meyer, T., North, M., de Graff, J., & Williford, J. (1995). Virtual Environments for Treating the Fear of Heights. *IEEE Computer*, 28(7), 27-34.
- Ignatova, Z., Martinez-Perez, I., & Zimmermann, K. H. (2008). *DNA Computing Models*. Boston, MA: Springer Verlag.
- Ijsselsteijn, W.A., de Ridder, H., Freeman, J., Avons, S., & Bouwhuis, D. (2001). Effects of stereoscopic presentation, image motion and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10, 298-311.
- Ijsselsteijn, W. A., de Ridder, H., Hamberg, R., Bouwhuis, D., & Freeman, J. (1998). Perceived depth and the feeling of presence in 3DTV. *Displays*, 18, 207-214.
- Iwata, H. (2003). Haptic Interfaces. In J. A. Jacko, & A. Sears, A. (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications* (pp. 206-219). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Jacob, R. J. K. (1990). What You Look At Is What You Get: Eye Movement-Based Interaction Techniques, *ACM CHI'90 Proceedings, Addison-Wesley/ACM Press*, 11-18.
- Jenewein, K., & Hundt, D. (2009). Wahrnehmung und Lernen in virtueller Realität – Psychologische Korrelate und exemplarisches Forschungsdesign. *IBBP Arbeitsberichte*, 74.
- Johnson, A., Roussos, M., Leigh, J., Vasilakis, C., Barnes, C., & Moher, T. (1998). The NICE project: Learning together in a virtual world. *In proc. of IEEE VRAIS 1998, Atlanta, Georgia, March 14-18*, 176-183.
- Kalawsky, R. S. (1993). *Virtual Reality and Virtual Environments. A Technical, Scientific, and Engineering Reference on Virtual Environments*. Wokingham: Addison-Wesley.
- Keevil, B. (1998). Measuring the Usability Index of Your WebSite. *Proceedings of the CHI '98. Human Factors in Computing Systems*, Los Angeles, CA.
- Kellogg, R. S., Kennedy, R. S., & Graybiel, A. (1965). Motion sickness symptomatology of labyrinthine defective and normal subjects during zero gravity maneuvers. *Aerospace Medicine*, 4, 315-318.
- Kennedy, R. S., Fowlkes, J. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1992). Use of a motion sickness history questionnaire for prediction of simulator sickness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 63(7), 588-593.

- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
- Kirakowski, J., & Cierlik, B. (1993). SUMI – The Software Usability Measurement Inventory. *British Journal of Educational Technology*, 24(3), 210-212.
- Kirakowski, J., Claridge, N., & Whitehand, R. (1998). *Human Centered Measures of Success in Web Site Design*. Available: <http://zing.ncsl.nist.gov/hfweb/att4/proceedings/kirakowski/> [Stand 30.06.2010].
- Kieras, D., & Polson, D. (1985). An approach to the formal analysis of user complexity. *International Journal of Man-Machine Studies*, 22, 365-394.
- Kolasinski, E. M. (1995). *Simulator sickness in virtual environments*. (Technical Report, 1027). Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Kolasinski, E. M. (1996). *Prediction of Simulator Sickness in a Virtual Environment*. PhD dissertation, Orlando: University of Central Florida, Psychology Department.
- Land, E. H. (1954). *Projection system for stereoscopic images*. US Patent 2,788,707.
- Laurel, B. (1990). *The art of human-computer interface design*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Laurel, B. (1991). *Computers as theatre*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Laurel, B. (1993). *Computers as Theatre*. Boston: Addison-Wesley.
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., & Davidoff, J. (2001). A cross-media presence questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10, 282-297.
- Lewis, C. (1982). *Using the „thinking aloud“ method in cognitive interface design*. New York: Elsevier.
- Lewis, C., & Wharton, C. (1997). Cognitive walkthroughs. In M. Helander, T. K. Landauer, & P. Prabhu (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (pp. 689-704). New York: Elsevier Press.
- Lin, H. X., Choong, Y.-Y., & Salvendy, G. (1997). A Proposed Index of Usability: A Method for Comparing the Relative Usability of Different Software Systems. *Behaviour & Information Technology*, 16(4), 267-278.
- Lin, J. J., Duh, H. B. L., Abi-Rached, H., Parker, D. E., & Iii, F. T. A. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference, 2002*, 164-171.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characteristics of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.
- Logitech Inc. (1991). *2D/6D Mouse Technical Reference Manual*. California.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). Available: <http://jcmc.indiana.edu/vol3/issue2/lombard.html> [Stand 30.06.2010].
- Malim, T. (1994). *Cognitive Processes: Attention, Perception, Memory, Thinking and Language*. London: Palgrave Macmillan.
- Masters, M. S., & Sanders, B. (1993). Is the gender difference in mental rotation disappearing? *Behavior Genetics*, 23, 337-341.
- McGee, M. (1979). *Human Spatial Abilities*. Praeger.
- McKenna, M., & Zeltzer, D. (1992). Three dimensional visual display systems for virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(4), 421-458.
- Mizell, D., Jones, S., Jackson, P., & Picket, D. (1995). Is VR Better than a Workstation: A Report on Human Performance Experiments. *Progress, Eurographics Workshop on Virtual Environments*, Monte Carlo.

- Mohs, C., Hurtienne, J., Kindsmüller, M. C., Israel, J. H., Meyer, H. A. & die IUUI Research Group (2006). IUUI – Intuitive Use of User Interfaces: Auf dem Weg zu einer wissenschaftlichen Basis für das Schlagwort „Intuitivität“. *MMI Interaktiv*, 11, 75-84.
- Mohs, C., Israel, J. H., Kindsmüller, M. C., Naumann, A. B., Hußlein, S., & IUUI Research Group (2007). Intuitive Benutzung als Ziel in der Produktentwicklung. In K. Röse & H. Brau (Hrsg.), *Usability Professionals 2007* (S. 165-168). Stuttgart: German Chapter der Usability P. Association.
- Molich, R., & Nielsen, J. (1990). Improving a human-computer dialogue. *Communications of the ACM*, 33(3), 338–348.
- Moreno, R., Mayer, R.E., Spires, H.A., & Lester, J.C. (2001). The Case for Social Agency in Computer-Based Teaching: Do Students Learn More Deeply When They Interact With Animated Pedagogical Agents?. *Cognition and Instruction*, 19(2), 177-213.
- Müller, K., & Hufnagel, H. (2002). Kollaboratives Lernen in 3D-Multiuserumgebungen. In G. Bachmann, O. Haefeli, & M. Kindt (Hrsg.), *Campus 2002: Die Virtuelle Hochschule in der Konsolidierungsphase* (S. 383-389). Münster: Waxmann.
- Müller-Holz, B., Aschersleben, H.; Hacker, W., & Bartsch, T.(1991). Methoden zur empirischen Bewertung der Benutzerfreundlichkeit von Bürosoftware im Rahmen von Prototyping. In M. K. Fresse, C. Skarpelis, & B. Zang-Scheucher (Hrsg.), *Software für die Arbeit für morgen* (S. 409–420). Berlin: Springer Verlag.
- Naepflin, U., & Menozzi, M. (1998). VFX1-Datenhelm im Vergleich mit 17" Monitor. Effekte der Benutzung unterschiedlicher Anzeigen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 52(4), 231-239.
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A., & Barfield, W. (2000). A review of presence and performance in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 12(1), 1-41.
- Neal, A. S., & Simons, R. M. (1984). Playback – a method for evaluation the usability of software and its documentation. In A. Janda (Ed.), *Proceedings of CHI '83 „Human Factors in Computing Systems“* (pp. 82–96). Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland.
- Nichols, S., Haldane, C., & Wilson, J. (2000). Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 471-491.
- Niegemann, H. M. (2008). Usability. In H. M. Niegemann, S. Domagk, S. Hessel, A. Hein, M. Hupfer, & A. Zobel (Hrsg.), *Kompendium multimediales Lernen* (S. 419-453). Heidelberg: Springer.
- Nielsen, J. (2001). *Jakob Nielsen's Alertbox, August 5, 2001: First Rule of Usability? Don't Listen to Users*. Available: <http://www.useit.com/alertbox/20010805.html> [Stand 30.06.2010].
- Nielsen, J. (1993). Usability evaluation and inspection methods. *Proceedings of the Interchi '93 Tutorial notes*.
- Norman, D. A. (1989). *Dinge des Alltags. Gutes Design und Psychologie für Gebrauchsgegenstände*. Frankfurt a. M., New York: Campus Verlag.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory*. New York: McGraw-Hill.
- Oppermann, R., Murchner, B., Reiterer, H., & Koch, M. (1992). *Softwareergonomische Evaluation – Der Leifaden EVADIS II*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Pape, D. (1999). *A VPL Research DataSuit*. Verfügbar unter: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:VPL_DataSuit_1.jpg [Stand 30.06.2010].
- Pausch, R., Proffitt, D., & Williams, G. (1997). Quantifying Immersion in Virtual Reality. *Computer Graphics (SIGGRAPH) Proceedings*, 13-18.
- Pausch, R., Shackelford, M. A., & Proffitt, D. (1993). A User Study Comparing Head-Mounted and Stationary Displays. *Proceedings of the IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*, 41-45.

- Peters, M., Laeng, B., Lathan, K., Jackson, M., Zaiyouna, R. & Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test: Different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, 28, 39-58.
- Porteous, M., Kirakowski, J., & Corbett, M. (1993). *SUMI User Handbook*. University College Cork, Ireland: Human Factors Research Group.
- Postmes, T., Spears, R., & Lea, M. (1999). Social identity, normative content and 'deindividuation' in computer-mediated groups. In N. Ellemers, R. Spears, & B. Doosje (Eds.), *Social identity: Context, commitment, content* (pp. 164-183). Oxford: Blackwell.
- Preece, J., Rogers, Y., Sharp, H., Benyon, D., Holland, S., & Carey, T. (1994). *Human-Computer Interaction*. Workingham: Addison-Wesley.
- Prothero, J. D., & Hoffman, H. D. (1995). Widening the field of view increases the sense of presence within immersive virtual environments. *Human Interface Technology Laboratory Technical Report*, University of Washington, Seattle, WA, R-95-4.
- Prümper, J., & Anft, M. (1993). Die Evaluation von Software auf Grundlage des Entwurfs zur internationalen Ergonomie-Norm 9241 Teil 10 als Beitrag zur partizipativen Systemgestaltung ein Fallbeispiel. In K.-H. Rödiger (Hrsg.), *Software Ergonomie '93: Von der Benutzeroberfläche zur Arbeitsgestaltung* (S. 145–156). Stuttgart: Teubner.
- Psotka, J. (1995). Immersive training systems: Virtual reality and education and training. *Instructional Science*, 23(5,6), 405-431.
- Quaiser-Pohl, C. & Jordan, K. (2004). *Warum Frauen glauben, sie könnten nicht einparken – und Männer ihnen Recht geben*. München: dtv.
- Rattay, O., Geiger, C., Herder, J., Goebels, G., & Nikitin, I. (2007). Zweihändige Interaktion in VR-Umgebungen. Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. In J. Gausemeier & M. Grafe, (Ed.), *HNI-Schriftenreihe* (S. 315–332). Paderborn.
- Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Motion Sickness*. London: Academic Press.
- Reeves, B. R. (1991). "Being there:" *Television as symbolic versus natural experience*. Unpublished manuscript. Stanford University, Institute for Communication Research, Stanford, CA.
- H. Reeves, H. (1999). *This Is Cinerama*. *Film History*.
- Regenbrecht, H., Schubert, T., & Friedmann, F. (1998). Measuring the Sense of Presence and its Relations to Fear of Heights in Virtual Environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(3), 233-249.
- Rheingold, H. (1991). *Virtual Reality*. New York: Summit.
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability, *Ecological Psychology*, 3, 195-240.
- Richard, P., Birebent, G., Coiffet, P., Burdea, G., Gomez, D., & Langrana, N. (1995). Effect of Frame Rate and Force Feedback on Virtual Object Manipulation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(1), 95-108.
- Rojas, R. (1998). *Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse*. Berlin: Springer.
- Rolland, J. P., Baillot, Y., & Goon, A. A. (2001). A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments. In W. Barfield, & T. Caudell (Eds.), *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality* (pp. 67-112). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc..
- Rotter, J. (1966). Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcements. *Psychological Monographs*, 80.
- Rubin, J. (1994). *Handbook of Usability Testing: How to plan, design, and conduct effective tests*. New York.

- Salzman, M. C., Dede, C. J., & Loftin, R. B. (1999). VR's frames of reference: A visualization technique for mastering abstract multidimensional information. *Computer-Human Interaction (CHI), Conference Proceedings*, 489–495.
- Schnurr, A. (2003). *3D-Eingabegeräte - ein Überblick*. Verfügbar unter: <http://schaugg.hdm-stuttgart.de/mj/pages/03ss/as45/as45.html> [Stand 30.06.2010].
- Schuemie, M. J., van der Straaten, P., Krijn, M., & van der Mast, C. A. P. G. (2001). Research on presence in virtual reality: A survey. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 183-201.
- Seymour, N. E. (2008). VR to OR: a review of the evidence that virtual reality simulation improves operating room performance. *World Journal Surgery*, 32(2), 182–188.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 120-126.
- Shneiderman, B. (1998). *Designing the User Interface*. Logman: Addison-Wesley.
- Singer, M., Allen, R., McDonald, D., & Gildea, J. (1997). *Terrain appreciation in virtual environments: Spatial knowledge acquisition* (Tech. Rep. No. 1056). Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Singer, M., Ehrlich, J., Cinqq-Mars, S., & Papin, J. (1995). *Task performance in virtual environments: Steroscopic vs. monoscopic displays and head-coupling* (Tech. Rep. No. 1034). Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Slater, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560- 566.
- Slater, M., Alberto, C., & Usoh, M. (1995). In the Building or Through the Window? An Experimental Comparison of Immersive and Non-Immersive Walkthroughs. *Virtual Reality Environments in Architecture*, Leeds, Computer Graphics Society.
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M., & Kooper, R. (1996). Immersion, Presence, and Performance in Virtual Environments: An Experiment with Tri-Dimensional Chess. Available: <http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/m.slater/Papers/Chess/index.html> [Stand 30.06.2010].
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Immersive Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 3, 130-144.
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6, 603-616.
- Stanney, K. M., Kennedy, R. S., & Drexler, J. M. (1997). Cybersickness is not simulator sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 41st Annual Meeting, 1138–1142.
- Stanney, K., Salvendy, G., Deisinger, J., DiZio, P., Ellis, S., Ellison, J., Fogleman, G., Gallimore, J., Singer, M., Hettinger, L., Kennedy, R., Lackner, J., Lawson, B., Maida, J., Mead, A., Mon-Williams, M., Newman, D., Piantanida, T., Reeves, L., Riedel, O., Stoffregen, T., Wann, J., Welch, R., Wilson, J., & Witmer, B. (1998). Aftereffects and sense of presence in virtual environments: Formulation of a research and development agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2), 135-187.
- Steele, R., Walder, C., & Herbert, M. (1992). Psychomotor testing and the ability to perform anastomosis in junior surgical trainees. *Br. J. Surg.*, 79, 1065–1067.
- Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73-93.
- Sturman, D., & Zeltzer, D. (1994). A Survey of Glove-based Input. *Computer Graphics and Applications*, 14(1), 30-39.

- Sutherland, I. E. (1965). The ultimate display. *Proceedings of the International Federation of Information Processing Congress, 2*, 506-508.
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three-dimensional display. In *Proc. FJCC, AFIPS Conference*, 33(1), 757-764.
- Takalato, J. (2002). *Presence and flow in virtual environments: An explorative study*. Available: http://eve.hut.fi/Publications/ttalo_thesiswoa.pdf [Stand 30.06.2010].
- Tan, D.S, Gergle, D., Scupelli, P.G., & Pausch, R. (2003). With Similar Visual Angles, Larger Displays Improve Spatial Performance. *Proceedings of CHI 2003*.
- Tate, D., Sibert, L., & King, T. (1997). Virtual Environments for Shipboard Firefighting Training. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, 61- 68.
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science*, 197, 493-495.
- Waldenfels, B. (2006). *Phänomenologie der Aufmerksamkeit*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 129-143.
- Ware, C. & Balakrishnan, R. (1994). Reaching for objects in VR displays: Lag and frame rate. *ACM Trans. on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 1(4), 331–356.
- Watson, B., Walker, N., & Hodges, L. (1995). A User Study Evaluating Level of Detail Degradation in the Periphery of Head-Mounted Displays. *Proceedings of Framework for Immersive Virtual Environments*, 203-212.
- Watson, B., Spaulding, V., Walker, N., & Ribarsky, R. (1997). Evaluation of the Effects of Frame Time Variation on VR Task Performance. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, 38-44.
- Watson, G. S. (1998). The effectiveness of a simulator screening session to facilitate simulator sickness adaptation for high-intensity driving scenarios. In *Proceedings of the IMAGE 1998 Conference*, (pp. 1-6). Scottsdale, AZ: The IMAGE Society.
- Watson, G. S. (2000). A synthesis of simulator sickness studies conducted in a high-fidelity driving simulator. *Driving Simulation Conference*, Paris, Frankreich.
- Weiner, B. (1974). *Achievement motivation and attribution theory*. Morristown, NJ: General Learning Press.
- Welch, R. B. (1997). The presence of aftereffects. In G. Salvendy, M. Smith, and R. Koubek (Eds.), *Design of computing systems: Cognitive considerations* (pp. 273-276). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers, San Francisco, CA, August 24-29.
- Welch, R. B., Blackmon, T., Liu, A., Mellers, B., & Stark, L. (1996). The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 263-273.
- Witmer, B.G., & Singer, M.J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240.
- Youngblut, C. (1998). *Educational Uses of Virtual Reality Technology*. Report to the Institute for Defence Analyses. IDA Doc. D-2128.
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 127-132.
- Zhai, S. (1995). *Human Performance in Six Degrees of Freedom Input Control*. Dissertation Thesis. University of Toronto.