

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Arbeitswissenschaft

**Gestaltung und Evaluation von
virtuellen und Telepräsenzsystemen
an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden**

Dipl. Psych. Helena Pongrac

Vollständiger Abdruck bei der
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichten Dissertation

Vorsitzender:.....

1. Berichterstatter:.....

2. Berichterstatter:.....

Diese Dissertation wurde am.....2008 bei der Universität der Bundeswehr
München, 85577 Neubiberg eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und
Raumfahrttechnik am.....2008 angenommen.

Tag der Prüfung:.....

1. Einführung und Fragestellungen	7
2. Präsenzepfinden und Aufgabenleistung bei virtuellen und Telepräsenzsystemen: Ein Literaturüberblick.....	11
2.1. Definitionen von (Tele-) Präsenzepfinden	12
2.2. Exkurs: Aufmerksamkeitstheorien und -definition.....	27
2.3. Messung von Präsenzepfinden	29
2.4. Empirisch ermittelte Komponenten von Präsenzepfinden	35
2.4.1. Persönlichkeitseigenschaften („traits“)	36
2.4.2. Persönlichkeitsvariablen („states“).	36
2.4.3. Kommunikationsvariablen und Informationen aus der vermittelten Umgebung	44
2.5. Empirisch ermittelte Zusammenhänge zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung	50
2.6. Zusammenfassung und Bedeutung für virtuelle und Telepräsenzsysteme	52
3. Akquisitions- und Übertragungsparameter im Kommunikationskanal.....	54
3.1. Abtastung und Quantisierung	54
3.2. Datenkompression.....	57
3.3. Probleme bei der Datenübertragung.....	60
3.4. Exkurs: Grundlagen der Psychophysik	60
4. Wahrnehmung und Einstellung von haptischen Akquisitions- und Übertragungsparametern unter Mitberücksichtigung der visuellen Modalität	63
4.1. Wahrnehmung und Einstellung von Kraft- und Richtungsdaten.....	66
4.1.1. Theoretische Grundlagen	67
4.1.2. Standardapparatur und -verfahren	68
4.1.3. Abtastfrequenz.....	71

4.1.4.	Quantisierungsintervall für Kraft- und Richtungsdaten	74
4.1.4.1.	Bestimmung des ebenmerklichen Kraftunterschieds bei Konstanthaltung der Richtung	74
4.1.4.2.	Bestimmung des ebenmerklichen Richtungsunterschieds bei Konstanthaltung der Kraft.....	80
4.1.5.	Quantisierungsart für Kraft	86
4.1.6.	Wahrnehmungsbasierte Kodierung von Kraft- und Richtungsdaten.....	92
4.1.6.1.	Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds bei gleichzeitiger Variation von Kraft und Richtung mittels zweier Vektoren mit einem Interstimulusintervall von 500 ms	92
4.1.6.2.	Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds bei gleichzeitiger Variation von Kraft und Richtung mittels Vektoraddition mit einem Interstimulusintervall von 0 ms	98
4.1.7.	Auswirkung der Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben	107
4.1.7.1.	Visuelles Auflösungsvermögen und obere Grenze für die Erkennung einer Kugel.....	108
4.1.7.2.	Haptisch obere Grenze für die Erkennung einer Kugel	109
4.1.7.3.	Hauptuntersuchung	110
4.1.8.	Zusammenfassung und Gestaltungshinweise	126
4.2.	Wahrnehmung und Einstellung von vibrotaktilen Daten	129
4.2.1.	Theoretische Grundlagen	130
4.2.2.	Standardapparaturen	132
4.2.3.	Abtastfrequenz.....	134
4.2.3.1.	Obere Frequenzschwelle.....	134
4.2.3.2.	Interpretierbarkeit von Vibrationen: Zusammenhang zwischen räumlicher und zeitlicher Frequenz mittels Texturmatching	141
4.2.4.	Quantisierungsintervall für Frequenz	152
4.2.4.1.	Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds für Frequenz mit dem Vibrationsgenerator.....	153
4.2.4.2.	Bestimmung des ebenmerklichen Unterschied für Frequenz mit dem PHANTOM.....	157
4.2.5.	Quantisierungsart für Frequenz	161
4.2.6.	Wahrnehmungsbasierte Kodierung von Vibration.....	164
4.2.7.	Effekte der Quantisierung von vibrotaktilen Daten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzempfinden	167
4.2.8.	Zusammenfassung und Gestaltungshinweise	175
4.3.	Psychologisch motivierte Kompression haptischer Daten	177

4.4	Auswirkungen von Zeitverzögerungen im Kommunikationskanal auf die menschliche Performanz und das Telepräsenzerleben	188
4.4.1.	Physiologische und Informationsverarbeitungsprozesse.....	188
4.4.2.	Effekte der Zeitverzögerung von visuellen und haptischen Daten auf die Aufgabenleistung	190
4.4.3.	Effekte der Zeitverzögerung von visuellen und haptischen Daten auf das Telepräsenzerleben.....	199
4.4.4.	Theoretische Herleitung des psychologischen Modells zu konstanter Zeitverzögerung von visuellen und haptischen Daten und Hypothesen	200
4.4.5.	Untersuchung der Effekte variabler Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden.....	202
4.4.6.	Untersuchung der Effekte konstanter Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzepfinden....	208
4.4.7.	Psychologisches Modell zu den Effekten der Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzepfinden....	221
4.4.8.	Zusammenfassung zu den Untersuchungen der Effekte haptischer und visueller Zeitverzögerung und Gestaltungshinweise.....	222
5.	Einfluss von Persönlichkeitsvariablen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben.....	225
5.1.	Theoretische Grundlagen.....	225
5.1.1.	Einfluss von Aufmerksamkeitsprozessen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung.....	225
5.1.2.	Einfluss der Übung auf das Präsenzepfinden.....	226
5.1.3.	Einfluss der Leistungsmotivation und der Konzentrationsfähigkeit auf das Präsenzepfinden	227
5.1.4.	Einfluss der Involviertheit auf das Präsenzepfinden	228
5.1.5.	Einfluss der Adaptationsfähigkeit auf das Präsenzepfinden	228
5.1.5.1.	Konstruktion und Validierung eines Fragebogens zur Anpassungsfähigkeit	229
5.2.	Erstellung des Gesamtmodells zum Einfluss von Persönlichkeitsvariablen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung und Hypothesen	230
5.3.	Standardapparatur und –verfahren	232
5.4.	Studie 1: Untersuchung der Effekte von Übung, Adaptationsfähigkeit, Leistungsmotivation und Konzentrationsfähigkeit auf Präsenzepfinden und Aufgabenleistung (Kontrollgruppe)	235

5.5. Studie 2: Untersuchung der Effekte von Aufmerksamkeitsprozessen und Involviertheit auf das Präsenzepfinden und Aufgabenleistung (Experimentalgruppe)	244
5.6. Zusammenfassung und Gestaltungshinweise	255
6. Einfluss von rückgemeldeten Informationen aus der entfernten Umgebung auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzepfinden.....	258
6.1. Variation der visuellen Informationen aus der entfernten Umgebung und deren Einfluss auf Aufgabenleistung und Telepräsenzepfinden.....	258
6.2. Variation der haptischen Informationen und deren Einfluss auf Aufgabenleistung und Telepräsenzepfinden.....	265
6.3. Zusammenfassung.....	281
7. Zusammenfassung und Diskussion der in dieser Arbeit aufgefundenen Ergebnisse	282
Literaturverzeichnis.....	290
Anhang A: Der Fragebogen von Scheuchenpflug (2001)	314
Anhang B: Berechnung der Solltrajektorie einer Ellipsenbahn auf einer Kugeloberfläche.....	321
Anhang C: Der Adaptabilitätsfragebogen von Pongrac & Bongartz (2007).....	324
Anhang D: Instruktionen zur Induktion von hoher bzw. niedriger Involviertheit	328
Anhang E: Screenshots für die Nebenaufgabe in der aktuellen Umgebung.....	332

1. Einführung und Fragestellungen

Virtuelle und Telepräsenzsysteme sind Anwendungen, bei denen ein menschlicher Operator (Benutzer) durch technische Mittel mit seiner subjektiven Wahrnehmung in einer anderen virtuellen oder entfernten Umgebung präsent ist.

Diese Systeme bestehen aus mehreren Komponenten: einem menschlichen Operator, dem Benutzer und einem oder mehreren Ein-/Ausgabegerät/en, mit denen der Benutzer die andere Umgebung manipulieren kann und Rückmeldungen aus dieser Umgebung erhält. Diese Daten werden über einen Kommunikationskanal übertragen. Eine weitere Komponente stellt die virtuelle oder entfernte Umgebung dar, in der der Teleoperator, eine ausführende Einheit, die vom Benutzer kontrolliert wird, dessen Aktionen in der vermittelten Umgebung umsetzt. Die folgende Graphik 1.01 stellt ein Telepräsenzsystem schematisch dar.

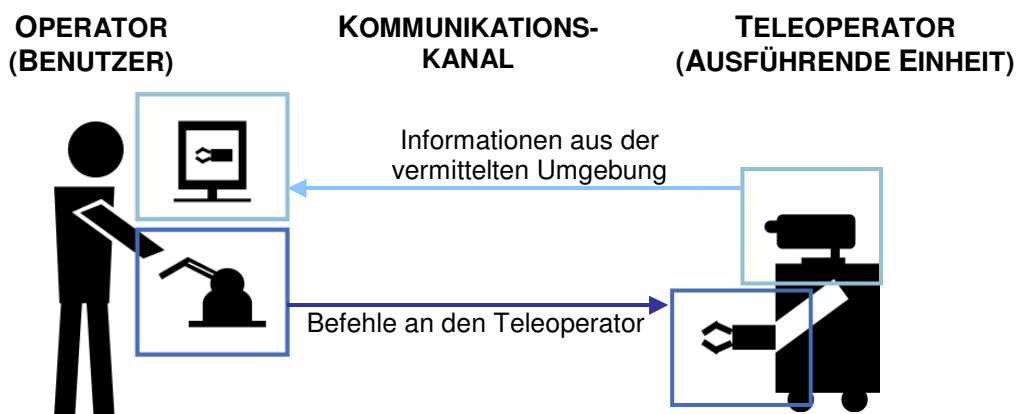


ABBILDUNG 1.01. Schematische Darstellung eines Telepräsenzsystems.

Bei Telepräsenzsystemen mit einer entfernten Umgebung ist die ausführende Einheit meist ein Telesensor oder ein Telemanipulator oder eine Kombination dieser beiden Entitäten mit einem Endeffektor. Bei einer virtuellen Umgebung werden der Kommunikationskanal und der Teleoperator über eine Software simuliert, der Teleoperator kann dabei auch lediglich aus einem Cursor bestehen (Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995; Sheridan, 1992a; Burdea, 1996).

Die wichtigsten Einsatzgebiete von Telepräsenzsystemen liegen in der Manipulation und Exploration von schwer zugänglichen und gefährlichen Umgebungen, wie beispielsweise in der minimal invasiven Roboterchirurgie oder in der Weltraum-Robotik, in der Produktion, z.B. Aufgaben der Montage oder Mikromontage, oder auch im Entertain- und Edutainmentbereich, in der virtuellen Expositionstherapie, in virtuellen Trainingsumgebungen oder in der virtuellen Produktentwicklung (Burdea, 1996).

Die Technologie von Telepräsenzsystemen dient dabei nicht nur der Überwindung großer Entfernungen, sondern auch dem Abbau von Barrieren, die es in vielen Anwendungen verhierten, dass menschliche Experten effizient eingesetzt werden konnten. Solche

Barrieren sind die räumliche Distanz (z.B. Weltraum), Sicherheitsanforderungen (z.B. kerntechnische Anwendungen), unterschiedliche Größenordnungen, die eine Skalierung der Dimensionsunterschiede erforderliche macht (z.B. Mikrosysteme) oder eine erschwerte Zugänglichkeit des Ortes, an dem eine Aktion erfolgen soll (z.B. menschliche Organe, die minimal invasiv behandelt werden sollen).

Da bei solchen Systemen die Rückmeldung von Informationen aus der entfernten Umgebung sehr wichtig für die effiziente Ausführung der telemanipulativen Aufgabe ist, wurde in den letzten Jahren die Qualität der Rückmeldung ständig verbessert. Ebenso ging die Entwicklung von rein visueller Rückmeldung hin zu multimodaler, also visueller, auditiver und haptischer Rückmeldung. Vor allem die Rückmeldung des haptischen Kanals, also des Berührungs- und Stellungssinns, wurde technisch sehr stark weiterentwickelt (z.B. Reiner, 2004; Stone, 2001).

Da virtuelle und Telepräsenzsysteme konzeptionell äquivalent sind, werden beide in dieser Arbeit im Folgenden unter dem Begriff Telepräsenzsysteme subsumiert.

Die Besonderheiten von Telepräsenzsystemen stellen der Kommunikationskanal und die Vermittlung der Wahrnehmung aus der virtuellen oder entfernten Umgebung mittels Darstellung der Informationen über Ein-/Ausgabegeräte dar. Die Kommunikation von Daten zwischen Benutzer und ausführender Einheit bzw. vermittelter Umgebung macht es möglich, die Signale zu modifizieren resp. zu verzerren oder zu verfälschen. Das stellt einen für den Benutzer unnatürlichen Zustand dar, da die Rückmeldungen aus der natürlichen Umwelt unmittelbar und nur in Ausnahmefällen verfälscht, verzerrt oder über Geräte vermittelt erfolgen. Weiterhin ist es in den meisten Anwendungen wichtig, die Datenmengen, die über den Kommunikationskanal übertragen werden, möglichst gering zu halten, um u.A. möglichst kleine Latenzzeiten zu erreichen.

Da die aktuelle Umgebung nicht mit der Umgebung übereinstimmt, in der die Wahrnehmung und die Aktionen des Benutzers stattfinden, wurde ein Konstrukt definiert, das speziell beim Benutzer in solchen Systemen auftreten sollte: das Präsenzempfinden, d.h. das Gefühl des Benutzers, in der vermittelten Umgebung präsent zu sein (z.B. Minsky, 1980; Sheridan, 1992b, 1994; Steuer, 1992, 1995; Witmer & Singer, 1998; Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995; Lombard & Ditton, 1997).

Wichtig ist in solchen Systemen vor allem die Aufgabenleistung, die meist schlechter ist als in der natürlichen Umwelt (z.B. Hofmann, Jäger, Deffke & Bubb, 2001; Ush, Catena, Arman & Slater, 2000). Die Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Präsenzempfinden sind sehr inkonsistent, so dass nicht von einer eindeutigen Beziehung zwischen diesen beiden Konstrukten ausgegangen werden kann.

Betrachtet man das schematisch dargestellte Telepräsenzsystem in Abbildung 1.01, so wird deutlich, dass alle Einzelkomponenten einer solchen Anwendung einen Einfluss auf das Präsenzempfinden und auf die Aufgabenleistung haben können. Auf der Seite des Benutzers sind diesbezüglich dessen Persönlichkeitseigenschaften und –variablen zu nennen, auf der Teleoperatorseite die Informationen, die dem Benutzer aus der vermittelten Umgebung übertragen werden sowie deren qualitative und quantitative Darstellung. Weiterhin können Eigenschaften des Kommunikationskanals und der Ein-/Ausgabegeräte dazu führen, dass das Präsenzerleben und die Aufgabenleistung modifiziert werden.

In einer vorangegangenen Dissertation wurde der Einfluss verschiedener Ein-/Ausgabegeräte auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung bereits ausführlich untersucht (Deml, 2004), daher ist diese Komponente nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Telepräsenzsysteme gestaltet und evaluiert. Ausgehend von den Teilkomponenten von Telepräsenzsystemen (s. Abb. 1.01) sollen dabei folgende Fragen beantwortet werden:

- (1A) Wie sollen – ausgehend von der menschlichen Wahrnehmung – die Parameter des Kommunikationskanals eingestellt werden, so dass die Rückmeldung von Informationen aus der vermittelten Umgebung für den Benutzer verständlich und interpretierbar sind?
- (1B) Wie wirkt sich die so vorgenommene Einstellung der Kommunikationsparameter auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung aus?
Als Schwerpunkte werden für die Fragen (1A) und (1B) vor allem haptische und visuelle Parameter betrachtet, insbesondere die Übertragung von Kraft- und Richtungs- sowie von vibrotaktilen Daten.
- (1C) Wie wirken sich die Kompression von Daten und Probleme bei der Datenübertragung wie Zeitverzögerung auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung aus?
- (2) Welchen Einfluss haben Persönlichkeitsvariablen wie beispielsweise Motivation und Aufmerksamkeitsprozesse auf das Präsenzerleben und die Aufgabenleistung?
- (3) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der haptischen und visuellen Darstellung der vermittelten Umgebung mit dem Präsenzepfinden und der Aufgabenleistung?

Zunächst wird im Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit ein Literaturüberblick über die vorgeschlagenen Definitionen, Komponenten und der Messung des Präsenzepfindens sowie dessen Bezug zur Aufgabenleistung geliefert. Dabei wird deutlich, dass vor allem Aufmerksamkeitsprozesse am Präsenzepfinden beteiligt sind. Da bei der Aufgabenleistung qualitativ andere Aufmerksamkeitsprozesse benötigt werden, können die inkonsistenten Ergebnisse bezüglich des Zusammenhangs zwischen Aufgabenleistung und Präsenzepfinden erklärt werden.

Im Kapitel 3 werden die grundlegenden Konzepte und Bestandteile von Kommunikationsparametern grob erläutert, bevor im vierten Kapitel die gestellten Fragen (1A) bis (1C) behandelt werden. Hier zeigt sich, dass die bestehenden Wahrnehmungslücken (z.B. ebenmerkliche Unterschiede) ausgenutzt werden können, um die Kommunikationsparameter und die Kompression von haptischen Daten einzustellen. Dabei zeigen sich zum Teil unterschiedliche Effekte auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung. Die Zeitverzögerung von haptischen und visuellen Daten übt negative Effekte sowohl auf das Präsenzepfinden als auch auf die Aufgabenleistung aus, die nur in geringem Maße durch technische Parameter kompensiert werden können.

Die Frage (2) wird im Kapitel 5 bearbeitet. Hier zeigt sich, dass die Übung einen individuell unterschiedlichen Effekt auf das Präsenzepfinden zeigt. Es konnten vier

Gruppen von Versuchspersonen gefunden werden, bei denen das Präsenzepfinden mit zunehmender Übung entweder abnahm, zunahm, konstant blieb oder einen oszillierenden Verlauf zeigte. Die Aufgabenleistung folgte dem Potenzgesetz der Übung. Die Leistungsmotivation und die Konzentrationsfähigkeit jedoch hatten keinen Einfluss auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung. Die Involviertheit zeigte keine Effekte auf das Präsenzepfinden. Bei der Verschiebung des Aufmerksamkeitsfokus bei der Aufgabe in der vermittelten Umgebung ergaben sich nur Effekte auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, nicht jedoch auf das Präsenzepfinden.

Für die Frage (3) schließlich werden beispielhaft zwei Evaluationen von Telepräsenzsystemen im Kapitel 6 dieser Arbeit vorgestellt. Hier zeigt sich, dass eine möglichst natürliche Rückmeldung aus der vermittelten Umgebung positive Auswirkungen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung zeigt.

Für einen besseren Überblick wird zu Anfang jedes Kapitels die Abbildung 1.01 kleinskaliert wiederholt, wobei die in dem betreffenden Kapitel behandelte Komponente farbig hervorgehoben wird.

Im Kapitel 7 werden die gefundenen Ergebnisse zusammengefasst und die Fragestellungen beantwortet und diskutiert.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten kollaborativen Sonderforschungsbereichs 453 („Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“) im Teilprojekt M5 („Gestaltung und Evaluation der Mensch-Roboter-Schnittstelle“).

2. Präsenzepfinden und Aufgabenleistung bei virtuellen und Telepräsenzsystemen: Ein Literaturüberblick

Die erstmalige Nutzung des Begriffs „Telepräsenzen“ wird Minsky (1980) zugeschrieben. Dieser bezeichnete damit Teleoperatoren, also Instrumente in einer entfernten Umgebung, die sich anfühlen und arbeiten, als wäre es die eigene Hand („Substitut für das Reale“). Minsky verwendete diesen Begriff, um die Wichtigkeit hochqualitativer Rückmeldung aus der entfernten Umgebung zu betonen. Nach Minsky ist die wichtigste und herausforderndste Aufgabe von Telepräsenzen, beim Benutzer ein Gefühl, in der entfernten Umgebung zu sein, zu erreichen.

Es bestehen einige Ungereimtheiten bezüglich der bei Telepräsenzsystemen verwendeten Begrifflichkeiten. Während Telepräsenzepfinden häufig das subjektive Gefühl des Benutzers kennzeichnet, sich in einer entfernten Umgebung zu befinden, wird Präsenzepfinden meist bei virtuellen Umgebungen verwendet und als das Gefühl bezeichnet, sich einer virtuellen Umwelt aufzuhalten (Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b). Transparenz hingegen benennt die Regelgüte eines Systems, d.h. wie wirklichkeitsnah die Informationen aus der entfernten bzw. virtuellen Umgebung bzw. die auftretenden Kräfte, die vorherrschenden Beleuchtungszustände etc. dargestellt werden (Hirche, 2005). Demnach sind Transparenz und die wirklichkeitsnahe Darstellung von Informationen (Wirklichkeitsnähe) technische Eigenschaften von Systemen, das (Tele-) Präsenzepfinden eine vom Benutzer erlebte subjektive Eigenschaft. Der Begriff Immersion wird häufig verwendet, um die den Benutzer „umhüllenden“ Eigenschaften eines Systems zu kennzeichnen, so dass sich dieser in die vermittelte Umgebung eingeschlossen fühlt. Dazu gehören beispielsweise Raumklang oder die Bereitstellung dreidimensionaler visueller Hinweise (Slater & Wilbur, 1997). Witmer & Singer (1998) verstehen unter Immersion die Bereitschaft des Benutzers, sich in eine vermittelte Umgebung hineinzusetzen und verstehen diesen Begriff als Persönlichkeitseigenschaft. Im Deutschen wurde dieser Term als „immersive Tendenz“ übersetzt (Scheuchenpflug, 2001).

Seit der erstmaligen Nutzung des Begriffs (Tele-) Präsenz wurde dieser einigen Änderungen und Erweiterungen unterworfen. In diesem Kapitel wird zunächst eine Übersicht aus der Literatur über die vorgeschlagenen Definitionen, die Komponenten und den Bezug zur Aufgabenleistung für das Präsenzerleben geliefert. Dabei wird deutlich, dass das Präsenzepfinden vor allem durch Aufmerksamkeitsprozesse erklärt werden kann. Das Verhältnis von zugewiesenen Aufmerksamkeitsressourcen auf die vermittelte Umgebung zu den gesamt verfügbaren Ressourcen kann als Präsenzepfinden definiert werden. In einem Exkurs wird daher kurz auf die wichtigsten Aufmerksamkeitsdefinitionen und –theorien eingegangen. Dabei wird festgestellt, dass Aufmerksamkeit kein einheitliches Konzept ist, das etwas wie die Beachtung bestimmter Stimuli kennzeichnet und an dem sowohl kognitive, perzeptuelle, motivationale und affektive Prozesse beteiligt sind.

Danach werden die Messmethoden und die verwendeten Maße für das Präsenzepfinden vorgestellt. Es wurden sowohl subjektive als auch objektive Maße vorgeschlagen. Als subjektive Maße wurden bereits einige Fragebögen entwickelt und validiert. Der einzig

deutsche validierte Fragebogen zur „Präsenz und immersiven Tendenz“ liegt von Scheuchenpflug (2001) vor und misst das Präsenzempfinden in virtuellen Umgebungen. Die immersive Tendenz wird als Persönlichkeitseigenschaft angenommen und bezeichnet die Bereitschaft, sich in eine vermittelte Umgebung hineinzusetzen. Andere vorgeschlagene subjektive Maße sind der subjektive Bericht sowie psychophysische Maße. Beide Messarten haben sich als geeignet herausgestellt, um das Präsenzempfinden zu erfassen. Ebenso wurden objektive Maße für das Präsenzempfinden genannt. Diese können weiter unterteilt werden in Aufgabenleistungs-, Verhaltensbeobachtungs- und physiologische Maße. Bei allen objektiven Messmethoden steht bislang die Validität in Frage, was zum größten Teil an der fehlenden theoretischen Konzeption des Begriffs Präsenzempfinden liegt.

Die in Untersuchungen empirisch gefundenen Faktoren, die zum Präsenzerleben beitragen, sowie die empirisch ermittelten Zusammenhänge zur Aufgabenleistung werden im Anschluss aufgezählt. Insgesamt zeigen sich hier sehr große Inkonsistenzen. Zudem liegen sowohl unterschiedliche Begriffsdefinitionen für dieselben Konzepte als auch unterschiedliche Befunde zum Zusammenhang zwischen demselben Konzept und dem Präsenzempfinden vor. Bei den Persönlichkeitseigenschaften und –variablen zeigt sich, dass vor allem affektive und motivationale Komponenten zum Präsenzempfinden beitragen, wohingegen der Beitrag von kognitiven und motorischen Bestandteilen zum Präsenzerleben aufgaben- und anforderungsabhängig ist und zum Teil interindividuelle Unterschiede auftreten. Bei den Variablen, die durch den Kommunikationskanal und durch die Rückmeldung aus der vermittelten Umgebung mediiert werden, zeigt sich, dass vor allem die Gesetzmäßigkeiten der Wahrnehmung, die in der natürlichen Umwelt existieren, in einer vermittelten Umgebung eingehalten werden sollten, um das Präsenzempfinden zu erhöhen. Bei perzeptuell veränderlichen und erlernbaren Variablen besteht eine starke Abhängigkeit von der Aufgabe und den Anforderungen.

Die im Anschluss aufgeführten empirischen Befunde zum Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und Aufgabenleistung legen nahe, dass die beiden Konzepte nicht miteinander kovariieren und nur durch Drittvariablen bzw. Aufmerksamkeitsprozesse verbunden sind.

In der abschließenden Zusammenfassung wird die Bedeutung der Befunde für Telepräsenz Anwendungen eruiert.

2.1. Definitionen von (Tele-) Präsenzempfinden

Der Begriff wurde seit dem ersten Auftreten auf unterschiedliche Weise definiert. Dabei wurden verschiedene Komponenten vorgeschlagen, ebenso wurde je nach Art der Definition der Bezug zur Aufgabenleistung unterschiedlich postuliert. Häufig wird unterteilt in Präsenzerleben, das in virtuellen Umgebungen auftritt, und Telepräsenzerleben, das bei Telemanipulationssystemen entsteht. Das Präsenzempfinden bzw. die Präsenz als verkürzter Begriff wird häufig mit der Phrase „sense of being there“ beschrieben. Bis heute liegt keine abgeschlossene Konzeption dieses Begriffs vor.

Tabelle 2.01 liefert eine Zusammenstellung aus Überblicksartikeln zum Präsenzempfinden bezüglich dessen Definition, Komponenten und Bezug zur Aufgabenleistung.

Analog zum ersten Kapitel dieser Arbeit wird hier nicht explizit zwischen Präsenzepfinden in virtuellen Umgebungen und Telepräsenzepfinden in entfernten Umgebungen unterschieden, da angenommen wird, dass dieselben kognitiven, perzeptuellen, motivationalen und affektiven Prozesse beteiligt sind. Auf die Umgebung, in der sich der Benutzer physisch aufhält, wird im Folgenden mit „aktueller Umgebung“ referiert.

TABELLE 2.01. Überblick über Definitionen, Komponenten und Bezug zur Aufgabenleistung von Präsenzepfinden aus Überblicksartikeln.

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
Minsky (1980); Akin, Minsky, Thiel & Kurtzmann (1983)	Gefühl, sich aktuell in der entfernten Umgebung zu befinden.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geschickte Manipulatoren (Fingerfertigkeit) ▪ Bereich der sensorischen Rückmeldung und Wirklichkeitsnähe 	Positiver Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung.
Heeter (1992, 2001)	Erfahrung der eigenen Präsenz in einer virtuellen Umgebung, die demselben Prozess des Erkennens und Validierens der Existenz des Selbst in der natürlichen Welt entspricht.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Subjektive) Persönliche Präsenz (Ausmaß, mit dem man sich in eine andere Umgebung hineinversetzt fühlt; „seeing is believing“ – Prinzip; „out of the body“ - Erfahrung) ▪ Soziale Präsenz (Ausmaß, mit dem andere Avatare in der entfernten bzw. virtuellen Umgebung existieren und reagieren) ▪ Umweltbedingte Präsenz (Responsivität des Systems; Fähigkeit, die Umgebung zu modifizieren, als Schlüsselkomponente) 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung, der allerdings auch aufgabenabhängig ist.
Held & Durlach (1992)	Gefühl, auf der entfernten Seite präsent zu sein, d.h. Transportieren der Fähigkeiten zum adaptiven Problemlösen und manipulativer Fertigkeiten in die entfernte bzw. virtuelle Umgebung.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensorische Faktoren (hohe Auflösung, großes Gesichtsfeld, crossmodale Konsistenz von Informationen, Abwesenheit von Artefakten, die die Anwesenheit von Displays signalisieren) ▪ Motorische Faktoren (viele Möglichkeiten der Interaktion, Sichtbarkeit der Bewegungen der Effektoren, gute Verdeckung des Vorhandenseins von Geräten auf der Teleoperatorseite, hohe Korrelation zwischen Bewegungen des Operators und Aktionen des Teleoperators) ▪ Identifikation des eigenen Körpers mit dem Slaveroboter ▪ Vertrautheit mit dem System 	Telepräsenzepfinden verbessert die Aufgabenleistung v.a. bei Aufgaben, die einen weiten Bereich haben, komplex und nicht klar definiert sind.

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzempfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzempfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
		(Übereinstimmung der kognitiven Repräsentation der Interaktionen von der entfernten bzw. virtuellen Umgebung mit der aktuellen Umgebung)	
Loomis (1992)	Ausmaß, mit dem sich der Benutzer selbst auf die entfernte bzw. simulierte Umgebung (distal) attribuiert, d.h. der Umfang, in dem man die entfernte bzw. virtuelle Umgebung in seine mentale Repräsentation der Umwelt einschließt (Externalisierung).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korrespondenz zwischen efferenten Kommandos des zentralen Nervensystems an die Muskulatur und afferenten Inputs an die sensorischen Organe (Passung zwischen Aktion und Rückmeldung), d.h. Wirklichkeitsnähe ▪ Persönlichkeitseigenschaften (Erfahrung, Übung) ▪ Identifikation des eigenen Körpers mit dem Slaveroboter 	Positiver Zusammenhang zwischen Telepräsenzempfinden und Aufgabenleistung.
Sheridan (1992b, 1994)	Gefühl, sich physisch in der virtuellen bzw. entfernten Umgebung zu befinden, als überzeugende Illusion und subjektives Erleben. Trennung zwischen Telepräsenz und virtueller Präsenz. Bei der virtuellen Präsenz ist es notwendig, ein mentales Modell der Umgebung zu generieren.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensorische Wiedergabetreue ▪ Sensorische Kontrolle ▪ Manipulierbarkeit der entfernten Umgebung ▪ Subjektive Faktoren 	Telepräsenzempfinden bzw. Präsenzempfinden in einer virtuellen Umgebung verbessert die Aufgabenleistung. Das Verhältnis der drei Systemkomponenten (Wiedergabetreue, Kontrolle, Manipulierbarkeit) zueinander ist aufgabenabhängig.
Steuer (1992, 1995)	Gefühl, in einer Umgebung zu sein; Erfahrung der Präsenz in einer Umgebung mit Hilfe von einem Kommunikationsmedium.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ „Lebendigkeit“ der Rückmeldung (sensorische Tiefe und sensorische Breite, „vividness“) ▪ Interaktivität zwischen Benutzer und Umgebung ▪ Übereinstimmung der Rückmeldung mit der Realität („realness“) 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und Aufgabenleistung.
Zeltzer (1992)	Gefühl, in und von dieser Welt zu sein.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Autonomie (Fähigkeit des Rechenmodells, auf simulierte Ereignisse und Stimuli zu reagieren) ▪ Interaktion (Zugriff auf Modellparameter in Echtzeit) ▪ Präsenz (Ausmaß, mit dem Eingangs- und Ausgangskanäle der Maschine an den Menschen angeglichen sind) 	Präsenzempfinden kann die Aufgabenleistung erhöhen, dies ist jedoch von der Aufgabe abhängig. Telepräsenzempfinden kann bei bestimmten Aufgaben die Aufgabenleistung behindern.
Slater & Usoh (1993a, 1993b); Slater, Usoh	Erfahrung in einer virtuellen Umgebung, woanders zu sein als an dem Ort, an dem man sich physisch befindet. Das Präsenzempfinden schließt dabei	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Endogene (subjektive) Faktoren (interindividuelle Unterschiede bzgl. der Informationsverarbeitungs- bzw. Repräsentations- 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und Aufgabenleistung.

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
& Steed (1994)	eine willentliche Beseitigung von Zweifeln bezüglich dem Ort, an dem man sich physisch befindet, ein. Erklärung der interindividuellen Unterschiede mittels Repräsentationspräferenz des Benutzers: <ul style="list-style-type: none"> ▪ bei vorwiegend visueller Informationsverarbeitungspräferenz resultiert das höchste Telepräsenzepfinden; ▪ bei vorwiegend auditiver Informationsverarbeitungspräferenz resultiert das niedrigste Telepräsenzepfinden; ▪ bei vorwiegend kinästhetischer Informationsverarbeitungspräferenz ist das Telepräsenzepfinden höher, wenn ein virtueller Avatar vorhanden ist, jedoch ist das Telepräsenzepfinden hier niedriger, wenn kein virtueller Avatar vorhanden ist. 	präferenz) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Exogene Faktoren (z.B. Auflösung der rückgemeldeten Informationen, Fehlen von Signalen, die die Anwesenheit von Geräten und Displays indizieren, großer Bereich von Interaktionen, hohe Korrelation zwischen Bewegungen des Operators und der Repräsentation der Person in der virtuellen Umgebung, Möglichkeit, die virtuelle Umgebung zu verändern, Responsivität von Objekten in der Umgebung) ▪ Virtuelle Repräsentation (Avatar) des Körpers des Benutzers 	
Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater (1995)	Gefühl, in einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort präsent zu sein. Präsenzepfinden als mentale Manifestation, als kognitives Konstrukt. Unterteilung in Präsenz bezüglich der aktuellen Umgebung und Präsenz bezüglich der virtuellen Umgebung.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirklichkeitsnahes Display ▪ Willentliche Akzeptanz des Gefühls, sich an einem anderen Ort präsent zu fühlen ▪ Minimum an motorischer Partizipation in der virtuellen Umgebung ▪ Kontinuität der Umgebung, so dass diese vorhersagbar und erlernbar ist ▪ Freude an der Teilnahme in der virtuellen Umgebung 	Präsenzepfinden verbessert die Aufgabenleistung, das Verhältnis der einzelnen Komponenten zueinander ist jedoch anwendungsbereichs- und aufgabenabhängig.
Schloerb (1995)	Unterscheidung zwischen subjektiver, objektiver und physikalischer Telepräsenz. Subjektive Telepräsenz als das Gefühl, physisch in der entfernten bzw. virtuellen Umgebung anwesend zu sein. Objektive Telepräsenz als Transformation der eigenen Fähigkeiten und Fertigkeiten in die entfernte bzw. virtuelle Umgebung, d.h. die Wahrscheinlichkeit, eine spezifische Aufgabe erfolgreich zu erfüllen. Objektive Telepräsenz ist somit gleichbedeutend mit der Aufgabenleistung. Die physikalische Präsenz ist die Existenz eines Objektes an einem bestimmten Ort zu einer	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirklichkeitsnähe, d.h. der Operator kann (idealer Weise) nicht zwischen aktueller und entfernter bzw. virtueller Umgebung differenzieren ▪ Objektive und kausale Interaktion zwischen Operator und entfernter bzw. virtueller Umgebung, d.h. die Möglichkeit, die vermittelte Umgebung zu manipulieren und entsprechende (kausal zusammenhängende) Rückmeldung zu erhalten (Informationsfluss) 	Objektive Telepräsenz ist gleichbedeutend mit der Aufgabenleistung. Subjektive Telepräsenz ist nur sinnvoll, wenn diese das Ziel ist wie beispielsweise bei einem telepräsenten Unterhaltungssystem.

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
Kim & Biocca (1997)	bestimmten Zeit. Telepräsenzepfinden als Transport über ein Medium als Ergebnis der Ausführung bestimmter Handlungen zu einer von der aktuellen Umgebung entfernten Umgebung. Bestimmte Aspekte der aktuellen Umgebung werden dadurch unzugänglich für den Benutzer. Nach der Erfahrung kehrt der Benutzer bewusst in die aktuelle Umgebung zurück.	Präsenzepfinden hat zwei unabhängige Dimensionen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefühl, „dort“ zu sein, wobei „dort“ die vermittelte Umgebung meint („arrival“) ▪ Gefühl, nicht „hier“ zu sein, wobei „hier“ die aktuelle Umgebung bezeichnet („departure“) 	Der Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung wird vermittelt über Aufmerksamkeitsprozesse und Eigenschaften der vermittelten Umgebung, die den Benutzer vom Gefühl, „dort“ zu sein, überzeugen.
Lombard & Ditton (1997)	Illusion, eine vermittelte Erfahrung sei nicht vermittelt. Da Präsenz also eine Wahrnehmungssillusion darstellt, ist das Präsenzepfinden eine Persönlichkeitsvariable.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Willentliche Unterdrückung von Zweifeln, sich nicht in der virtuellen Umgebung zu befinden ▪ Involviertheit ▪ Systemfaktoren (z.B. Realismus der Rückmeldung, Anzahl sensorischer Kanäle, Auffälligkeit der Systemanlage) ▪ Soziale Faktoren (z.B. Anwesenheit anderer Personen in der virtuellen Umgebung) 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung.
Slater & Wilbur (1997)	Bewusstseinszustand, das psychologische Empfinden, in einer virtuellen Umgebung zu sein. Immersion als Beschreibung der Technologie, d.h. die Bereitstellung einer einschließenden, weiten, umgebenden und lebendigen Illusion der Realität an die menschlichen Sinne. Präsenz sowohl als subjektive Beschreibung (eigenes Empfinden) als auch als objektive Beschreibung (Verhalten in der virtuellen Umgebung ist analog zum Verhalten, das in der aktuellen Umgebung ausgeführt werden würde) eines Zustandes einer Person in Hinsicht auf eine bestimmte Umgebung	Komponenten von Immersion: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einschließende Erfahrung, d.h. die Displays sollten frei von Signalen sein, die die Existenz von Geräten anzeigen ▪ Lebendigkeit (realistische Darstellung der virtuellen Umgebung) ▪ Propriozeptives Zusammenpassen zwischen Körperbewegungen und Rückmeldung ▪ Weite Umgebung (z.B. Raumklang) ▪ Interaktivität, d.h. die Möglichkeit des Benutzers, die virtuelle Umgebung zu kreieren und zu manipulieren ▪ Selbstrepräsentation in der virtuellen Umgebung (z.B. virtueller Körper) 	Immersion erhöht sowohl das Präsenzepfinden als auch die Aufgabenleistung, d.h. Immersion als medierende Drittvariable zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung.
Draper, Kaber & Usher (1998)	Nebenprodukt der Aufmerksamkeitsressourcen, die auf die entfernte Umgebung gerichtet werden, gemessen an den Aufmerksamkeitsressourcen, die auf die aktuelle Umgebung gerichtet werden.	Zwei verschiedene Ansätze, um Telepräsenzepfinden zu definieren und zu untersuchen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologischer Ansatz: Betonung der Rolle von Kontroll- und Display-technologie ▪ Psychologischer Ansatz: Verhaltenskybernetik 	Präsenzepfinden hat keinen direkten Einfluss auf Aufgabenleistung und mentale Arbeitsbelastung („workload“). Sowohl Präsenzepfinden als auch Aufgabenleistung werden durch Prozesse der Aufmerksamkeits-

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
		<p>(Beziehung zwischen Rückmeldung aus und Manipulation der entfernten Umgebung), „Flow“-Erlebnis (Konzentration auf eine Aktivität und Ausblendung von störenden Stimuli), distale Attribution (überzeugender Eindruck, sich in der entfernten Umgebung zu befinden), Situationsbewusstsein (v.a. bzgl. der entfernten Umgebung)</p>	<p>zuweisung vermittelt.</p>
<p>Witmer & Singer (1998)</p>	<p>Subjektive Erfahrung, an einem Ort oder in einer Umgebung anwesend zu sein, selbst wenn man sich selbst physisch an einem anderen Ort bzw. in einer anderen Umgebung befindet. Das Präsenzepfinden hängt dabei direkt von der Involviertheit und der Immersion ab. Involviertheit ergibt sich aus der Fokussierung der Aufmerksamkeit auf eine Stimuluskonfiguration, diese Fokussierung hängt ab vom Grad der zugesprochenen Signifikanz bzw. Bedeutung von Stimuli, Aktivitäten oder Ereignissen. Immersion bezeichnet einen psychologischen Zustand, der als subjektive Erfahrung die Bereitschaft kennzeichnet, sich von einer virtuellen Umgebung umhüllt und eingeschlossen zu fühlen und mit dieser zu interagieren. [Die Komponente „Immersion“ wurde später von Scheuchenspflug (2001) als „immersive Tendenz“ übersetzt und bezeichnet eine Persönlichkeitseigenschaft („trait“).]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontrollfaktoren (Ausmaß der Kontrolle, Unmittelbarkeit der Kontrolle, Antizipation von Ereignissen, Kontrollmethode, Modifikationsmöglichkeit der vermittelten Umgebung) Dieser Faktor wirkt nicht auf Involviertheit, sondern nur auf Immersion ▪ Sensorische Faktoren (sensorische Modalität, Reichhaltigkeit der Umgebung, multimodale Präsentation, Konsistenz der multimodalen Präsentation, Ausmaß der Bewegungswahrnehmung, Möglichkeit der aktiven Suche) Dieser Faktor wirkt sowohl auf Involviertheit als auch auf Immersion ▪ Distraktoren (Isolation von der aktuellen Umgebung, selektive Aufmerksamkeit, Bemerkung von Schnittstellen) Dieser Faktor wirkt sowohl auf Involviertheit als auch auf Immersion ▪ Realismusfaktoren (Szenenrealismus, zur objektiven Umgebung konsistente Informationen, Bedeutungshaltigkeit der Erfahrung, negative Nacheffekte nach der „Rückkehr“ zur aktuellen Umgebung) Dieser Faktor wirkt nur auf Involviertheit, nicht auf Immersion 	<p>Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung, der jedoch von weiteren wichtigen Faktoren (z.B. sensomotorische Fertigkeiten) überdeckt werden kann.</p>
<p>Stanney, Mourant &</p>	<p>Kontinuierliche Wahrnehmung, die gerichtete Aufmerksamkeit</p>	<p>Faktoren, die zur Aufgabenleistung in virtuellen</p>	<p>Die Aufgabenleistung hängt direkt vom</p>

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzempfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzempfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
Kennedy (1998); Stanney & Salvendy (1998)	erfordert und auf der Interaktion der sensorischen Stimulationen, Umgebungsfaktoren und internalen Tendenzen basiert.	Umgebungen beitragen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Komplexität der Navigation durch die virtuelle Umgebung ▪ Präsenzempfinden ▪ Erfahrung bzw. Übung ▪ Motorische Fertigkeiten ▪ Alter ▪ Defizite in Wahrnehmung und Kognition ▪ Persönlichkeitsvariablen ▪ Menschliche sensorische Fähigkeiten Faktoren, die zum Präsenzempfinden beitragen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfachheit der Interaktion ▪ Benutzerinitiierte Kontrolle ▪ Realistische bildhafte Darstellung ▪ Aufenthaltsdauer in der virtuellen Umgebung ▪ Soziale Faktoren (Existenz anderer Individuen in der virtuellen Umgebung) ▪ Systemfaktoren (Anzahl rückgemeldeter Modalitäten, stereoskopische Hinweisreize etc.) 	Präsenzempfinden ab.
Zahorik & Jenison (1998)	Präsenzempfinden als „in der Welt sein“, d.h. erfolgreich unterstützte Aktionen in der Umwelt als notwendige und hinreichende Bedingung.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfüllung von Benutzererwartungen, d.h. möglichst realistische Darstellung ▪ Wahrnehmungs-Aktions-Kopplung ▪ Beibehaltung von ähnlichen Invarianten (Analogien zur realen Welt) 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und Aufgabenleistung.
Bystrom, Barfield & Hendrix (1999)	Gefühl, sich woanders aufzuhalten, als dort, wo man sich physisch befindet.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Displaytechnologie ▪ Immersion ▪ Sensorische Wirklichkeitsnähe ▪ Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen ▪ Willentliche Unterdrückung von Zweifeln ▪ Aufgabenschwierigkeit und -erfordernisse 	Ein Minimum an Telepräsenzempfinden ist notwendig für eine ausreichende Aufgabenleistung. Das Ausmaß an nötigem Telepräsenzempfinden wird durch die Aufgabenschwierigkeit bestimmt. Je schwieriger eine Aufgabe ist, desto höher ist das für eine bestimmte Aufgabenleistung notwendige Telepräsenzempfinden. Dieser Zusammenhang wird vermittelt über Aufmerksamkeitsprozesse. Gute Displays führen zu einem höheren Telepräsenzempfinden und

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
Huang & Alessi (1999)	Gefühl, in einer bestimmten Umgebung präsent zu sein.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Betonung des emotional-affektiven Aspekts von Telepräsenzepfinden 	<p>nur dann zu einer höheren Aufgabenleistung, wenn diese für die Aufgabenerfüllung benötigt werden.</p> <p>Positiver Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung, vermittelt über emotional-affektive Prozesse.</p>
Slater (1999)	Gefühl, sich in einer virtuellen Umgebung zu befinden, wobei die virtuelle Umgebung dominanter als die aktuelle Umgebung ist. Präsenzepfinden als das Gefühl, vielmehr einen „Ort“ zu besuchen als nur (computergenerierte) Bilder zu sehen.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aussehen des Avatars (möglichst realistische Darstellung des Benutzers) ▪ Art der Fortbewegung des Avatars (möglichst direkt mit den Benutzerbewegungen gekoppelt) ▪ Personenvariablen (v.a. Modalitätspräferenz, s. Slater & Usoh, 1993a, 1993b) 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung.
Welch (1999)	Subjektives Erleben, in einer vom Computer oder durch ein Teleoperatorsystem vermittelten generierten Umgebung physisch lokalisiert zu sein und nicht an dem Ort, an dem das Gerät wirklich ist.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausmaß an automatisierten Handlungen ▪ Aufgabentyp und Aufgabenerfordernisse 	Telepräsenzepfinden fördert die Aufgabenleistung nur bei Aufgaben, die neu gelernt werden und bei denen noch keine Automatisierung stattgefunden hat. Telepräsenzepfinden hat jedoch keinen Einfluss auf die Aufgabenleistung bei automatisierten Handlungen. Möglicher Weise führt Telepräsenzepfinden zu einem positiven Transfer der Aufgabenleistung in der virtuellen bzw. entfernten Umgebung auf die aktuelle Umgebung.
Nash, Edwards, Thompson & Barfield (2000)	Sinneseindruck des Seins, den man durch die Wahrnehmung der aktuellen Umwelt über automatische und kontrollierte mentale Prozesse erhält. Unterscheidung zwischen Präsenz in der aktuellen Umgebung, virtueller Präsenz und Telepräsenz. Die beiden letzteren Konzepte werden als „Ego-Präsenz“ zusammengefasst. Interindividuelle Unterschiede werden durch die Vermittlung über mentale Prozesse erklärt.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faktoren des Systems und der entfernten bzw. virtuellen Umgebung (z.B. sensorische Breite (Anzahl angesprochener Modalitäten), sensorische Tiefe (Auflösung), Realismus, Update-Rate) ▪ Faktoren des Kommunikationsmediums (dies sollte „unaufdringlich“ sein, d.h. vom Benutzer nicht bemerkt werden) ▪ Persönlichkeitsvariablen (Adaptationsfähigkeit, Erfahrung und Übung, 	Der Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung ist aufgaben- bzw. anforderungsabhängig. Das Problem ist die unterschiedliche Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen bezüglich Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung. Beim Telepräsenzepfinden sind dies die Ressourcen, die auf die entfernte bzw.

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
		Motivation, Zuteilung an Aufmerksamkeitsressourcen, Identifikation mit einem Avatar) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Störungen aus der realen Umgebung ▪ Aufgabenschwierigkeit und -erfordernisse 	virtuelle Umgebung verteilt werden in Relation zu allen Ressourcen. Die Aufgabenleistung kommt zustande durch Ressourcen, die auf die Aufgabe gelenkt werden. Dies lässt eher darauf schließen, dass beide Konstrukte unabhängig voneinander und durch Drittvariablen verbunden sind, insbesondere durch die Verteilung von Aufmerksamkeitsressourcen.
Ijsselsteinj, Freeman & de Ridder (2001)	Illusorische Veränderung der Perspektive bzw. Wahrnehmungstäuschung, dass die entfernte bzw. virtuelle Umgebung nicht vermittelt ist.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Veränderter psychologischer Zustand (vergleichbar zum Traum) ▪ Gedankensprung in der Imagination ▪ Vermittelte Wahrnehmung (vergleichbar zum Schauen von Filmen) 	Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung unklar.
Jeandrain (2001a, 2001b)	Psychologischer Zustand, in dem die Existenz des Mediums nicht wahrgenommen wird, d.h. das Medium ist „transparent“. Telepräsenzepfinden als intrinsisch motivierte Aktivität, wodurch die virtuelle bzw. entfernte Umgebung den Grad ihrer Überzeugungskraft bestimmt (motivationale Prozesse als Mediatorvariable). Telepräsenzepfinden ist demnach eine Haltung, die über direkte Erfahrung durch motivationale Prozesse vermittelt wird, wobei entweder die zentrale oder die periphere Route bei der Überzeugung gewählt wird (vgl. Petty & Cacioppo, 1986). Wenn die Überzeugung über die zentrale Route gewonnen wurde, sind periphere Hinweisreize (d.h. Eigenschaften der virtuellen bzw. entfernten Umgebung) nicht so wichtig. Unterscheidung zwischen physischem Telepräsenzepfinden (“sense of being there”), sozialem Telepräsenzepfinden (“sense of interacting with others”) und Co-Präsenzepfinden (“sense of being co-located with others”).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mediencharakteristiken (z.B. Vermittlung über Geräte und Displays sollte nicht bemerkt werden) ▪ Persönlichkeitsvariablen (v.a. motivationaler Zustand und Veranlagung) 	Telepräsenzepfinden hat positive Effekte: <ul style="list-style-type: none"> • psychologisch (Vergnügen, „Flow“-Erlebnis) • physiologisch (Erregung, Bewegung, automatische Reaktionen, sekundäre Effekte) • auf das Verhalten (Aufgabenleistung, Übungsausmaß)
Schuemie, van der Straaten,	Gefühl, sich einer computergenerierten Umgebung zu befinden.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realistische Darstellung der virtuellen Umgebung ▪ Gefühl der Beförderung in 	Der Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
Krijn & van der Mast (2001)		<p>die vermittelte Umgebung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefühl der Immersion, d.h. des „Eintauchens“ in die virtuelle Umgebung ▪ Soziale Faktoren (Anwesenheit anderer Benutzer in der virtuellen Umgebung, Medium als sozialer Akteur) 	Aufgabenleistung wird vermittelt über Aufmerksamkeitsprozesse.
Waterworth, Waterworth, Holmgren, Rimbarck & Lauria (2001); Waterworth & Waterworth (2003)	Verhältnis zwischen der Zuteilung an Aufmerksamkeitsressourcen auf die virtuelle Umgebung und deren Stimuli und der Zuteilung auf die aktuelle Umgebung und deren Stimuli.	<p>Drei Dimensionen der Erfahrung des Präsenzerlebens:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Locus: Zuteilung der Aufmerksamkeitsressourcen auf die virtuelle oder die aktuelle Umgebung ▪ Focus: Art der Aufmerksamkeit des Benutzers bzgl. der aktuellen Stimuli in der virtuellen bzw. aktuellen Umgebung (von konkret bis abstrakt) ▪ Sensus: Aufmerksamkeitszustand des Benutzers (von wachsam bis schläfrig) 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Das Verhältnis der Zuteilung an Aufmerksamkeitsressourcen ist dabei abhängig von den Anteilen an konkreten und abstrakten Informationsverarbeitungsprozessen. Je konkreter die dargebotene Information verarbeitet wird, desto höher ist das Präsenzepfinden.
Anania (2002)	Erfahrung, seinen Verstand über Medien zu anderen Orten, Personen und entworfenen Umgebungen zu projizieren.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gehirnprozesse und sensomotorisches System ▪ Kognitive Parameter und Repräsentationssysteme ▪ Entwurf von optimalen Erfahrungen 	Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung unklar.
Ijsselsteijn (2002)	Präsenzepfinden als „feeling of being there“ ist ein kognitives Produkt. Da die Realität auch über die Sinnesorgane vermittelt ist, ergeben sich bzgl. Präsenzepfinden große interindividuelle Unterschiede, die von perzeptuell-motorischen Fertigkeiten, mentalen Zuständen, Eigenschaften, Bedürfnissen, Vorlieben und Erfahrungen abhängen.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mediencharakteristiken: diese können unterteilt werden in Medienform und Medieninhalt (z.B. Eigenschaften der realen Umgebung, statische und dynamische visuelle Tiefeninformationen, Auflösung und Helligkeit von Bildern, effektive Bildgröße) ▪ Das verwendete Medium sollte keine sich bereits ausgebildeten kognitive Medienschemata ansprechen, um die vermittelte Natur der Erfahrung nicht zu betonen ▪ Der Benutzer sollte sich als Handelnder und Urheber der erreichten Effekte fühlen ▪ Eigenschaften des Benutzers (kognitiver und Wahrnehmungsstil) 	Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung unklar.
Sadowski & Stanney (2002a, 2002b)	Wahrnehmungsfluss, der gerichtete Aufmerksamkeit erfordert.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Externe Faktoren (z.B. Einfachheit und Ausmaß der Interaktion, benutzerinitiierte Kontrolle, 	Die Autoren nehmen an, dass es einen positiven Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
		bildhafter Realismus, Aufenthaltsdauer in der virtuellen Umgebung) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Interne Faktoren (interindividuelle Unterschiede bei der visuellen, auditiven und kinästhetischen Wahrnehmung) ▪ Soziale Faktoren (z.B. Anwesenheit anderer Benutzer in der vermittelten Umgebung) ▪ Systemfaktoren 	Aufgabenleistung gibt, der durch Interaktivität und Involviertheit des Benutzers vermittelt wird.
Bandini, Manzoni, Nunnari & Simone (2003)	Präsenz als Gefühl, sich in der virtuellen bzw. entfernten Umgebung zu befinden, was vermittelt wird durch das Verstehen der Bedeutung, was „dort“ vor sich geht.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutungsvoller Informationsfluss ▪ Bewusstsein über die Koordination von Problemlöseaktivitäten 	Positiver Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung.
Luciani, Urma, Marliere & Chevrier (2003)	Gefühl, sich in der entfernten bzw. virtuellen Umgebung zu befinden, wobei die reale Umgebung des Benutzers sowie dessen sensomotorische und kognitive Fähigkeiten so stark wie möglich an die physikalischen, funktionalen und strukturellen Merkmale der entfernten bzw. virtuellen Umgebung angepasst werden sollen.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realismus der Darstellung ▪ Korrektheit der Darstellung ▪ Taktil-kinästhetische Manipulationsmöglichkeit ▪ Akustische, visuelle und taktil-kinästhetische Rückmeldung 	Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung unklar.
Mantovani & Castelnuovo (2003)	Emotionales und kognitives Gefühl, sich in der virtuellen Umgebung zu befinden. Präsenzepfinden ist dabei ein multidimensionales Konstrukt, bestehend aus räumlichem Präsenzepfinden, sensorischem Präsenzepfinden, sozialem Realismus, Engagement, sozialem Präsenzepfinden, Co-Präsenzepfinden, Benutzer als sozialer Akteur in dem Medium, Medium als sozialer Akteur.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hightech- und immersive virtuelle Umgebung ▪ Multisensorische Erfahrung über visuelle, auditive und haptische Kanäle ▪ Fokus der Aufmerksamkeit auf virtueller Umgebung ▪ Abwesenheit des Fokus der Aufmerksamkeit bzgl. der aktuellen Umgebung 	Positiver Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung, insbesondere auf Lerneffekte und Transfer des in der virtuellen Umgebung Erlernten auf die aktuelle Umgebung.
Marsh (2001, 2003)	Gefühl, sich in der entfernten bzw. virtuellen Umgebung zu befinden. Betonung des Konzeptes „staying there“, d.h. Aufrechterhaltung des Fokus der Aufmerksamkeit auf die vermittelte Umgebung. Dazu muss die entfernte bzw. virtuelle Umgebung mittels Interaktivität Erfahrungen beim Benutzer induzieren.	Anlehnung an die Wahrnehmung beim Anschauen von Filmen, bei denen nach Boorstin (1995) drei kompetitive Kategorien beim Benutzer entstehen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ voyeuristisch (Freude, etwas Neues zu sehen und damit zu interagieren) ▪ viszeral (Nervenkitzel, Evozieren realistischer Empfindungen und Gefühle) ▪ stellvertretend (Transfer von Emotionen über eine andere Person oder ein anderes 	Zusammenhang zwischen Telepräsenzepfinden und Aufgabenleistung unklar.

Autoren	Definition von (Tele-) Präsenzepfinden	Komponenten des (Tele-) Präsenzepfindens (Objekt)	Angenommener Bezug zur Aufgabenleistung
Lee (2004)	Psychologischer Zustand bzw. subjektive Wahrnehmung, in der alle individuellen aktuellen Erfahrungen über Technologie generiert oder gefiltert wird. Physikalisches Präsenzepfinden als Zustand, in dem virtuelle Objekte als aktuelle physikalische Objekte sensorisch oder nichtsensorisch erfahren werden. Selbstpräsenzepfinden als psychologischer Zustand, in dem das virtuelle Selbst als aktuelles Selbst sensorisch oder nichtsensorisch erfahren wird. Präsenzepfinden als bestimmender Faktor aller vermittelter Erfahrungen und der Interaktion mit Medien- und Simulationstechnologien (vom Lesen eines Buches bis zur Anwesenheit in einer virtuellen Umgebung).	<p>Erfahrungen können auf zwei Arten virtuell sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfahrung wird virtuell, wenn der Vorgang der Erfahrung über Technologie vermittelt wird ▪ Erfahrung wird virtuell, wenn die erlebten Objekte artifiziiell kreiert bzw. durch eine Technologie simuliert werden <p>Drei Typen von Verhaltensweisen von Benutzern werden durch die vermittelte Erfahrung evoziert:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wahrnehmung ▪ Manipulation ▪ Interaktion <p>Es gibt drei Arten von Erfahrungen, die mit Hilfe zweier unabhängiger Dimensionen beschrieben werden können: sensorisch vs. nichtsensorisch und physikalisch vs. imaginär vs. virtuell:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ sensorisch, physikalische Objekte: reale Erfahrung ▪ nichtsensorisch, imaginäre Objekte: Halluzination ▪ sensorisch oder nichtsensorisch, virtuelle Objekte: virtuelle Erfahrung 	Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung unklar.

Wie aus Tabelle 2.01 ersichtlich wird, wurde das Konzept Präsenzepfinden kontinuierlich erweitert. Während die ersten Konzeptionen annahmen, dass das Präsenzepfinden durch eine rein passive Einwirkung der Darstellung der virtuellen bzw. entfernten Umgebung zustande kommt, wurde zunehmend die aktive Rolle des Benutzers in das Konzept integriert, wonach die willentliche Unterdrückung von Zweifeln (Slater & Usoh, 1993a, 1993b), die willentliche Akzeptanz der Erfahrung einer vermittelten Umgebung (Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995), die aktive distale Attribution (Loomis, 1992), das Verstehen von Bedeutungen (Bandini, Manzoni, Nunnari & Simone, 2003) und die aktive Aufmerksamkeitsfokussierung auf die vermittelte Umgebung (Draper, Kaber & Usher, 1998; Stanney & Salvendy, 1998; Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001; Waterworth & Waterworth, 2003; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b; March, 2001, 2003) wesentliche Bestandteile des Präsenzkonstrukts darstellen.

Auf Grund der empirisch ermittelten interindividuellen Unterschiede beim Präsenzepfinden wurde der Einfluss von Benutzerzuständen, Persönlichkeitsvariablen und -

eigenschaften auf das Präsenzepfinden postuliert, wobei kognitive, perzeptuelle, motivationale und affektiv-emotionale Prozesse genannt werden (z.B. Slater, Usoh & Steed, 1994; Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995; Jeandrain, 2001a, 2001b; Huang & Alessi, 1999).

Der Entwurf der Darstellung der vermittelten Umgebung und der Systemfaktoren wurde ebenfalls komplexer. Zunehmend wurde die dynamische Interaktion mit der Möglichkeit, die vermittelte Umgebung zu modifizieren, in den Vordergrund gerückt (z.B. Heeter, 1992; Sheridan, 1992b, 1994), wobei die crossmodale Konsistenz der Informationen (z.B. Held & Durlach, 1992), die kausale Kopplung zwischen Benutzerhandlungen und Rückmeldungen aus der vermittelten Umgebung (z.B. Loomis, 1992; Slater & Usoh, 1993a, 1993b; Schloerb, 1995; Slater & Wilbur, 1997; Draper, Kaber & Usher, 1998) bis hin zur Anpassung der Eigenschaften der vermittelten Umgebung an die kognitiven Fähigkeiten des Benutzers (Luciani, Urma, Marliere & Chevrier, 2003) als notwendig für das Präsenzepfinden erachtet wurden.

Ebenso veränderten sich die Annahmen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Während einige Autoren eine uneingeschränkte positive Beziehung annehmen (z.B. Minsky, 1980; Loomis, 1992), wurde der Zusammenhang zunächst an dessen Aufgabenabhängigkeit relativiert (z.B. Heeter, 1992; Zeltzer, 1992). Dabei wurde sowohl ein genereller Beitrag des Präsenzepfindens zur Aufgabenleistung (z.B. Held & Durlach, 1992) als auch der Beitrag einzelner Komponenten aufgabenspezifisch angenommen (z.B. Sheridan, 1992b, 1994). Andere Forscher postulieren, dass die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden voneinander unabhängige Konzepte darstellen (z.B. Schloerb, 1995), deren Zusammenhang entweder über Drittvariablen oder über gemeinsame Aufmerksamkeitskomponenten moderiert wird (z.B. Slater & Wilbur, 1997, Witmer & Singer, 1998; Bystrom, Barfield & Hendrix, 1999; Welch, 1999; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b; Draper, Kaber & Usher, 1998; Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001).

Da in der empirischen Forschung keine konsistenten Korrelationen zwischen Aufgabenleistung und Präsenzepfinden aufgedeckt wurden, geben einige Autoren an, dass der Zusammenhang zwischen diesen beiden Konstrukten bislang unklar ist (Ijsselsteijn, Freeman & de Ridder, 2001; Anania, 2002; Ijsselsteijn, 2002; Luciani, Urma, Marliere & Chevrier, 2003; Marsh, 2001, 2003; Lee, 2004).

Ferner wurde als Erweiterung das soziale Präsenzepfinden bzw. das Co-Präsenzepfinden bei Multi-User-Telepräsenzszenarien eingeführt, was als Bewusstheit der simultanen Anwesenheit einer oder mehrerer anderer Personen in der auch für diese Agenten vermittelten Umgebung (von einer minimalen Annahme über den Zustand anderer bis zu einem tiefen Verständnis des psychologischen Zustands des anderen), als die Effektivität der von dem anderen Agenten empfangene Nachricht (verbale und nichtverbale Kommunikation) und als das Erkennen der Interaktionsmöglichkeit mit dem anderen Benutzer definiert wird (Blake, Casanueva & Nunez, 2000; Durlach & Slater, 2000; Basil, 2001; Biocca, Burgoon, Harms & Stoner, 2001; Biocca, Harms & Gregg, 2001; De Greef & Ijsselsteijn, 2001; Nowak, 2001; Nowak & Biocca, 2001; Russo, 2001; Zhao, 2001; Biocca, Harms & Burgoon, 2003; McLaughlin, Sukhatme, Peng, Zhu & Parks, 2003; Nowak & Biocca, 2003; Slater, Sadagic,

Usoh & Schroeder, 2000). Da das Co-Präsenzempfinden nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wird dieses Konzept hier nicht weiter vertieft.

Die Inklusion der „subjektiven Erfahrung“ sowie der Persönlichkeitseigenschaften und –variablen jeweils mit perzeptuellem Bezug in die Definitionen von Präsenzempfinden löste eine Debatte über die Ontologie des Präsenzempfindens aus. Ontologie meint die Wissenschaft des Seins, d.h. die philosophischen Aspekte der Erfahrung von Realität und Sein (Weissmahr, 1991). Die Annahme, die Wahrnehmung einer vermittelten Umgebung folge demselben Prozess wie der Wahrnehmung der aktuellen Umgebung (z.B. Heeter, 2001; Zeltzer, 1992), führte zu einer Diskussion über den Vermittlungscharakter der Wahrnehmung der aktuellen Umgebung. Da alles, was vom Menschen wahrgenommen und subjektiv empfunden wird, über Sinnesorgane vermittelt ist, bleibt unklar, ob die Realität eine objektive, vom Beobachter unabhängige oder eine subjektive, aus internaler Verarbeitung abgeleitete Qualität ist (Carr & England, 1993). Dabei werden zwei gegensätzliche philosophische Positionen gegenübergestellt: der Konstruktivismus und der Realismus.

Beim Konstruktivismus wird davon ausgegangen, dass die subjektive Wahrnehmung kein Abbild der Realität, sondern immer eine Konstruktion aus einer Reizkonfiguration und kognitiven Prozessen eines Individuums ist. Die Wahrnehmung wird als Top-down-Prozess aufgefasst, wonach Eigenschaften von Objekten auf Grund der Interaktion, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und der Erfahrung mit diesen Objekten kognitiv konstruiert werden. Die Gestaltpsychologie gehört zu diesen Ansätzen (Sheridan, 1999; Mantovani & Riva, 1999; Carr & England, 1993; Flach & Holden, 1998; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Anania, 2003).

Einige Forscher betonten in ihrer Konzeption des Präsenzempfindens die Wichtigkeit von Vorerfahrungen und Interaktionen mit der virtuellen Umgebung, um kognitiv ein mentales Modell der Umgebung konstruieren zu können (z.B. Slater & Wilbur, 1997; Slater & Usoh, 1993a, 1993b; Slater, Usoh & Steed, 1994; Marsh, 2001, 2003; s. Tab. 2.01).

Oppositionell steht der Realismus als Bottom-up-Wahrnehmungsprozess, wonach Reizkonfigurationen ohne kognitive Prozesse verarbeitet und analysiert werden. Der wahrnehmungsökologische Ansatz von Gibson (1982) kann in diese Kategorie eingeordnet werden (Carr & England, 1993; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Retaux, 2003; Renaud, Chartier, Albert, Decaire, Cournoyer & Bouchard, 2007). Diesem Ansatz zufolge werden die Informationen aus der Umwelt entnommen, die eine Handlung unterstützen und daher einen bestimmten Aufforderungscharakter besitzen (Flach & Holden, 1998; Carr & England, 1993; Sheridan, 1999; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Retaux, 2003). Entsprechend definieren Zahorik und Jenison (1998, s. Tab. 2.01) Präsenzempfinden als „erfolgreich unterstützte Aktionen“ in einer virtuellen Umgebung. Besonders wichtig ist dabei die Extraktion invarianter Informationen, d.h. Eigenschaften der Umgebung eines Beobachters, die sich bei dessen Eigenbewegung nicht ändern und aus denen dieser ein dreidimensionales Bild mit den zugehörigen Relationen und Perspektiven seiner Umwelt erstellt (Gibson, 1950; Carr & England, 1993). Weiterhin entnimmt der Beobachter Informationen aus seiner Umgebung mittels der umgebenden optischen Anordnung („optical flow“), was die Strukturierung des Lichts auf Grund der Reflexion von Objektmerkmalen bezeichnet (Nichols, Haldane & Wilson, 2000).

Vor allem die frühen Definitionen von Präsenzepfinden schlossen sich den Ansichten des Realismus an und deklarierten Wirklichkeits- und Wiedergabetreue als unablässig für das Präsenzepfinden (Minsky, 1980; Akin, Minsky, Thiel & Kurtzmann, 1983; Loomis, 1992; Schloerb, 1995; Bystrom, Barfield & Hendrix, 1999).

Die beiden gegensätzlichen Ansätze haben sowohl auf die Entwicklung und Konstruktion von virtuellen Umgebungen bzw. auf die erforderliche Rückmeldung aus der entfernten Umgebung als auch auf die Aufgabenleistung als auch für das Präsenzepfinden unterschiedliche Konsequenzen. Während nach konstruktivistischen Ansätzen vor allem die Vorerfahrung sowie die Interaktion und die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit und in der virtuellen Umwelt relevant sind, steht beim Realismus die Wirklichkeits- und Wiedergabetreue von virtuellen Umgebungen im Vordergrund.

Beim Konstruktivismus ist die Wiedergabetreue sekundär, hier muss die virtuelle Umgebung extrem reliabel sein, damit Lernen aus konsistenter Erfahrung stattfinden kann (Carr & England, 1993). Der aufwendige Prozess der Umsetzung wirklichkeitsnaher Displays wäre somit nicht erforderlich, um eine optimale Aufgabenleistung und ein maximales Präsenzepfinden erreichen zu können, das Augenmerk sollte vielmehr auf die Responsivität des Systems gerichtet werden.

Legt man den Realismus-Ansatz zu Grunde, werden weitaus höhere Anforderungen an die Entwicklung und Umsetzung eines Telepräsenzsystems gestellt. Die Darstellung der vermittelten Umgebung dürfte sich hier nicht von der Darstellung der aktuellen Umgebung unterscheiden, um sowohl die Aufgabenleistung als auch das Präsenzepfinden zu maximieren.

Sheridan (1999) schlug zur Lösung dieses Problem einen eklektischen Ansatz vor, d.h. einen Mischansatz, der sowohl konstruktivistische als auch realistische Elemente enthält (s. auch Lauria, 2001). Dem Autor zufolge kann die „echte“ Realität zwar nie in ihrer Vollständigkeit erfasst, jedoch auf Grund sensorischer Handlungsbeschränkungen geschätzt werden. Damit wird die Priorität auf die Rückmeldung von Informationen aus der virtuellen bzw. entfernten Umgebung gesetzt, da hier ebenjene sensorischen Handlungsbeschränkungen an den Benutzer vermittelt werden. Die Schätzung ist in Form eines internalen Handlungs-Erlebens-Zuordnungsmodells vorhanden. Diese kognitiven Repräsentationen können mit Hilfe von Handlungen und Empfindungen modifiziert und verfeinert werden.

Hingegen postulierten Mantovani und Riva (1999, 2001) den von Sheridan (1999) vorgeschlagenen Schätzansatz als eine mögliche Methode, die Benutzer anwenden und definierten die Realität als relationalen Raum, der gemeinsam in der Umgebung und in der Kognition existiert und der an die menschliche Psyche angepasst ist. Die Anpassung wird dabei kulturell, sozial und historisch geformt. Sheridan (2001) kritisierte an diesem Modell, dass die objektive Realität negiert wird und dem Modell zufolge nur noch die virtuelle und die subjektive Realität existieren.

Bei der menschlichen Wahrnehmung sind sowohl Top-down- (wie beim Konstruktivismus postuliert) als auch Bottom-up-Prozesse (dem Realismus zufolge) beteiligt. Welche Anteile dieser beiden Prozesse bei der Wahrnehmung von spezifischen vermittelten Umgebungen beteiligt sind und welche Auswirkungen diese auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden haben, ist bislang ungeklärt.

Wenn zugrundelegt wird, dass die Wahrnehmung der aktuellen und die der vermittelten Umgebung denselben Gesetzmäßigkeiten folgt, ist unabhängig von der Konstruktivismus-Realismus-Debatte der entscheidende Unterschied zwischen der aktuellen und der vermittelten Umgebung die Wahrnehmung dieser Mediation bei der virtuellen bzw. entfernten Umgebung (Biocca, 2001). Selbst wenn die aktuelle Umgebung individuell subjektiv -wie vom radikalen Konstruktivismus postuliert- vermittelt wird, so wird die Mediation im Fall der aktuellen Umgebung im Gegensatz zur virtuellen bzw. entfernten Umgebung nicht wahrgenommen. Bezogen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzempfinden ist dann die entscheidende Frage, inwiefern diese Wahrnehmung der Mediation als Distraktor wirkt, d.h. wie viel aufgabenirrelevante Aufmerksamkeitsressourcen durch diese Vermittlung abgezogen werden. Unabhängig von der Definition des Konzeptes „Aufmerksamkeit“ verteilen sich in der aktuellen Umwelt die Aufmerksamkeitsressourcen nur auf Stimuli innerhalb einer Umgebung. Bei einer telepräsenten Anwendung geschieht die Zuteilung der Ressourcen innerhalb und zwischen zwei (bzw. zwischen mehreren bei simultaner Darstellung mehrerer vermittelter) Umgebungen; hier müssen die Aufmerksamkeitsressourcen zusätzlich auf die Stimuluskonfigurationen einer oder mehrerer zusätzlicher Umgebungen gerichtet werden. Mit diesem Ansatz lassen sich alle bisherigen Konzepte des Präsenzempfindens erklären, da sowohl interindividuelle Unterschiede und subjektive Zustände, Systemkomponenten als auch die Darstellung der vermittelten Umgebung Einflüsse auf die Zuteilung von Aufmerksamkeitsressourcen haben.

Daher wird für diese Arbeit das (Tele-) Präsenzempfinden wie folgt definiert:

(Tele-) Präsenzempfinden bezeichnet einen speziellen Aufmerksamkeitszustand, bei dem die Aufmerksamkeitsressourcen auf verschiedene Stimuli innerhalb und zwischen der aktuellen und einer oder mehrerer vermittelten Umgebungen verteilt werden. Je mehr Ressourcen im Verhältnis auf die Gesamtressourcen auf die vermittelte Umgebung gerichtet sind bzw. je weniger Ressourcen durch die Vermittlung abgezogen werden, desto höher ist das (Tele-) Präsenzempfinden.

Im folgenden Exkurs werden die wichtigsten Theorien und Definitionen des Konstrukts Aufmerksamkeit behandelt.

2.2. Exkurs: Aufmerksamkeitstheorien und -definition

Aufmerksamkeit kann definiert werden als die (bewusste) Zuweisung von Ressourcen, um die für die Verarbeitung wichtigen Informationen zu extrahieren und die weniger wichtigen zu vernachlässigen (Anderson, 1996, S. 73).

Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen fokussierter (selektiver), verteilter und Daueraufmerksamkeit (Styles, 1997). Bei der fokussierten Aufmerksamkeit wird einer von mehreren Inputs, bei der verteilter Aufmerksamkeit werden alle von mehreren Inputs verarbeitet. Die Daueraufmerksamkeit (Vigilanz) beschreibt einen länger andauernden Zustand, bei dem die Entdeckungs- und Unterscheidungsleistung möglichst lange Zeit aufrecht erhalten wird (Konzentration).

Schon früh entstanden Filtertheorien der selektiven Aufmerksamkeit, die von einem Kanal mit limitierter Kapazität und einem universellen Verarbeitungskanal, der den Flaschenhals bei der Verarbeitung darstellt, ausgingen (z.B. Broadbent, 1958; Treisman, 1960; Deutsch & Deutsch, 1963; Neisser, 1967). Die Funktion der Aufmerksamkeit wurde bei diesen frühen Theorien darin gesehen, dass diese als Schutz des limitierten Kapazitätssystems des Gehirns vor sensorischer Reiz- und Informationsüberflutung dient. Um ein ökonomisches Arbeiten zu gewährleisten, sollten alle nichtselektierten Informationen von der weiteren Analyse ausgefiltert werden. In der Fachliteratur wurde lange Zeit darüber diskutiert, ob die relevanten Informationen früh auf Grund physikalischer bzw. sensorischer Merkmale, also vor dem Flaschenhals, oder spät unter Einbeziehung des Langzeitgedächtnisses, demnach nach dem Flaschenhals, selektiert werden (Styles, 1997). Inzwischen ist bekannt, dass beide Prozessarten zutreffen, was vor allem von der perzeptuellen Last abhängt. Ist die perzeptuelle Last hoch, findet eine frühe Auswahl statt, ist die Last niedrig, so werden die Informationen spät ausgewählt (Treisman, 1993; Lavie, 1995).

Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Zuteilung von Aufmerksamkeitsressourcen durch Erwartungshaltungen, Vor- und Zusatzinformationen und –erfahrungen und kategoriales bzw. semantisches Priming beeinflusst werden kann („attentional cueing“; z.B. Eriksen & Eriksen, 1974; Posner, Boies, Eichelman & Taylor, 1969; Posner & Snyder, 1975; Neely, 1977; Simon, 1990).

Die Untersuchungen zur verteilten Aufmerksamkeit beschäftigen sich v.a. mit kontrollierten und automatischen Prozessen (LaBerge, 1973; Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977). Während kontrollierte Prozesse seriell und top-down-gerichtet ablaufen, werden automatische Prozesse parallel und bottom-up-gerichtet ausgeführt.

Aus der Forschung zur fokussierten und verteilten Aufmerksamkeit entstand ein wichtiges Paradigma zur Messung der kognitiven Last bzw. der Kapazität der Informationsverarbeitung, das Doppelaufgabenparadigma. Bei diesem Paradigma wird neben der Hauptaufgabe eine leicht erlern- und ausführbare Nebenaufgabe gestellt. Durch die Erfassung der Leistung in der Sekundäraufgabe kann die kognitive Last bei der Primäraufgabe durch den Vergleich mit der alleinigen Leistung in der Haupt- und Nebenaufgabe gemessen werden (z.B. Posner & Boies, 1971).

Neuere Theorien der Aufmerksamkeit gehen nicht mehr von einem Filtermodell, also einer limitierten Aufmerksamkeitskapazität, aus, sondern von einer sehr hohen bis unbegrenzten Kapazität. Allerdings hat die Aufmerksamkeit bedingt durch das begrenzte menschliche Handlungsausführungssystem die Funktion, eine kohärente und „sinnvolle“ Reaktion, die aus vielen Einzelreaktionen zusammengesetzt sein kann, zu steuern und zu gewährleisten. Durch die ständige Neusetzung von Prioritäten muss die Handlung stets neu koordiniert werden, um chaotische Verhaltensweisen zu verhindern. Die Fokussierung der Aufmerksamkeit folgt daher einem ständigen Abgleich zwischen einem internen Handlungsplan und der Wahrnehmung externer Ereignisse, die sich konstant verändern. Die Aufmerksamkeit ist also ein extrem schneller Prozess, der in Echtzeit abläuft und höhere kognitive Prozesse mit einschließt („selection for action“-Theorie; Allport, 1987; Neuman, 1987).

Festzuhalten bleibt, dass Aufmerksamkeit kein einheitliches Konzept darstellt, deren Fokussierungsleistung aufgabenabhängig ist und bei der sowohl kognitive, perzeptuelle,

motivationale als auch affektive Prozesse an der Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen beteiligt sind.

2.3. Messung von Präsenzepfinden

Für die Messung von Präsenzepfinden wurden sowohl subjektive als auch objektive Datenerhebungsmethoden vorgeschlagen (Insko, 2003; Sheridan, 1992b; Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995; Schloerb, 1995; Huang & Alessi, 1999; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Freeman, Lessiter & Ijsselsteijn, 2001; Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b; Whalen, Noel & Stewart, 2003; Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater, 2005).

Zu den wichtigsten subjektiven Maßen gehören Fragebögen, Ratingskalen, subjektive Berichte, Interviews und psychophysische Maße. Subjektive Maße haben eine hohe Augenscheinvalidität, sind einfach und kostengünstig durchzuführen und interferieren nicht mit der Erfahrung des Benutzers, während dieser einer vermittelten Umgebung ausgesetzt ist.

Da die Antworten bei den subjektiven Maßen jedoch auf Selbstbeobachtungen basieren, sind diese auch subjektiven Verzerrungen und Verfälschungstendenzen (z.B. motivationale Faktoren wie soziale Erwünschtheit) unterworfen. Zudem werden subjektive Daten meist nach der telepräsenten Erfahrung erhoben, was zu kognitiven erinnerungsbedingten Verzerrungen führen kann. Ebenso spielen Ermüdungseffekte bei der Beantwortung eine Rolle. Speziell bei telepräsenten Anwendungen besteht das Problem, dass der Term „Telepräsenzepfinden“ erklärt bzw. umschrieben werden muss, da dieses Konzept den meisten Probanden unbekannt ist.

Da jedoch das Telepräsenzepfinden ein subjektiver, nicht direkt beobachtbarer Zustand ist, werden subjektive Maße zur Messung des Telepräsenzepfindens sehr häufig eingesetzt.

Objektive Maße können unterteilt werden in Verhaltensmaße und physiologische Maße. Zu den Verhaltensmaßen gehören die Aufgabenleistung und die Verhaltensbeobachtung. Die Vorteile von Verhaltensmaßen zur Bestimmung des Telepräsenzepfindens sind, dass keine subjektive Verzerrung stattfinden kann und kein Eingriff in die vermittelte Umgebung notwendig ist. Allerdings gibt es hier zu wenig Studien bezüglich der Validität von Verhaltensmaßen, da konzeptionell noch nicht vollständig geklärt ist, ob mit bestimmten Verhaltensmaßen, insbesondere mit der Aufgabenleistung, das Telepräsenzerleben tatsächlich gemessen wird. Bei der Verhaltensbeobachtung kommt hinzu, dass die Maße möglicher Weise nicht objektiv sind, also durch den Versuchsleiter verzerrt sein können.

Physiologische Maße wie Wechsel in der Herzrate, der Hautleitfähigkeit oder der Hauttemperatur haben den Vorteil, dass sie objektiv, also unabhängig vom Versuchsleiter sind und dass eine kontinuierliche Messung möglich ist. Allerdings gibt es hier sehr große interindividuelle Unterschiede und bei bestimmten Maßen erfolgt die Reaktion auf Umwelteinflüsse sehr langsam oder zeitversetzt (z.B. bei der Änderung der Hauttemperatur). Zudem sind physiologische Messungen häufig invasiv bzw. über Geräte vermittelt, was ebenso wie bei den subjektiven Maßen zur Reaktivität des Benutzers führen kann. Das Hauptproblem bei den physiologischen Maßen besteht darin, dass die Richtung und die Interpretation unbestimmt sind, beispielsweise verursacht Freude dieselbe Beschleunigung in der Herzrate wie Angst (Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000).

In der folgenden Tabelle 2.02 werden empirisch bereits eingesetzte bzw. vorgeschlagene Maße für das Telepräsenzempfinden nebst den empirischen Befunden, sofern diese vorhanden sind, vorgestellt.

TABELLE 2.02. Empirisch benutzte bzw. vorgeschlagene Maße für das Telepräsenzempfinden.

	In der Literatur vorgeschlagene Maße	Empirische Befunde
SUBJEKTIVE MASSE		
<i>Fragebögen / Ratingskalen</i>	<p>Witmer-Singer-Presence-Questionnaire PQ (Witmer & Singer, 1998, s. Tab. 2.01) misst Präsenzempfinden auf einer 7-Punkt-Likert-Skala, indem die zugrunde liegenden Faktoren „immersive Tendenz“ und „Involviertheit“ gemessen werden mittels</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontrollfaktoren, ▪ Sensorische Faktoren, ▪ Distraktoren, ▪ Realismusfaktoren. 	<p>Eichstichprobe: 152 Versuchspersonen, Fragebogen besteht aus 37 Fragen, 19 davon zur Involviertheit, 18 zur Immersion. Cronbachs α war 0.88 für die Involviertheitsskala und 0.81 für die Immersionsskala.</p>
	<p>Präsenz-Fragebogen (Scheuchensflug, 2001): deutsche Übersetzung v.a. des Witmer-Singer-Presence-Questionnaires, misst sowohl das Präsenzerleben als Persönlichkeitsvariable als auch die immersive Tendenz als Persönlichkeitseigenschaft. 3 Faktoren des Präsenzempfindens werden gemessen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ räumliches Präsenzempfinden, ▪ Qualität der Schnittstelle, ▪ emotionale Involviertheit. <p>Zwei Faktoren der immersiven Tendenz werden angenommen und gemessen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ emotionale Involviertheit, ▪ Ausmaß der Involviertheit. 	<p>Eichstichprobe: 165 Versuchspersonen, Fragebogen besteht aus 54 Fragen, 42 davon zum Präsenzempfinden, 12 zur immersiven Tendenz. Cronbachs α war 0.85 für die Skala zum Präsenzempfinden und 0.78 für die Skala zur immersiven Tendenz.</p>
	<p>Slater-Usuh-Steed-Questionnaire SUS (Slater, Usuh & Steed, 1994, s. Tab. 2.01) misst Präsenzempfinden auf einer Prozentpunktskala (0 – 100 Punkte) über Variationen der drei Konstrukte</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefühl, in einer virtuellen Umgebung zu sein, ▪ Ausmaß, mit dem die virtuelle Umgebung als dominante Realität erinnert wird, ▪ Ausmaß, mit dem die virtuelle Umgebung als Ort erinnert wird. 	<p>Dieser Fragebogen wurde hauptsächlich in den Forschungsarbeiten von Slater, Usuh und Steed eingesetzt, jedoch nicht daran validiert, daher sind keine Testkriterien bekannt.</p>
	<p>ITC-Sense of Presence Inventory ITC-SOPI (Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff, 2001) misst Präsenzempfinden auf einer 5-Punkte-Likert-Skala als subjektiven Zustand unabhängig von der Technologie an Hand der mittels Faktorenanalyse gefundenen zugrundeliegenden Faktoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefühl von physikalischem Raum in der virtuellen Umgebung, ▪ Engagement, ▪ ökologische Validität, ▪ negative Effekte (z.B. Simulatorkrankheit). 	<p>Eichstichprobe: 604 Versuchspersonen, Fragebogen besteht aus 43 Fragen, davon 19 Fragen zum Gefühl von physikalischem Raum, 13 Fragen zum Engagement, 5 Fragen zur ökologischen Validität und 6 Fragen zu negativen Effekten. Cronbachs α war 0.94 für die Skala zum Gefühl von physikalischem Raum, 0.89 für die Skala zum Engagement, 0.76 für die Skala zur ökologischen Validität und 0.77 für die Skala zu negativen Effekten.</p>

	In der Literatur vorgeschlagene Maße	Empirische Befunde
	<p>Kategorierating bei mehreren Attributen (z.B. Sheridan, 1992b, 1994):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirklichkeitsnähe von Bildern, Geräuschen, taktiler Information, ▪ Möglichkeit, die Sensorposition zu modifizieren, ▪ Möglichkeit, die vermittelte Umgebung zu verändern. 	
Subjektiver Bericht / Interviews	<p>„Breaks in Presence“ BIP, „Presence Counter“ (Slater & Steed, 2000; Brogni, Slater & Steed, 2003; Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater, 2005):</p> <p>kontinuierliches Maß, bei dem die Versuchspersonen nach einem Training während ihrer Erfahrung in der virtuellen Umgebung die Übergänge zwischen aktueller und virtueller Umgebung angeben. Die Anzahl sowie die Zeit der Übergänge werden summiert, daraus wird die relative Zeit ermittelt, in der die Versuchspersonen in der virtuellen Umgebung präsent waren.</p>	<p>Die „Breaks in Presence“, d.h. die Anzahl der Übergänge des Aufmerksamkeitsfokus von der vermittelten auf die aktuelle Umgebung, korrelierten negativ mit dem selbstberichteten Präsenzepfinden (Slater & Steed, 2000; Brogni, Slater & Steed, 2003).</p> <p>Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater (2005) fanden einen hohen korrelativen Zusammenhang zwischen der Anzahl der „Breaks in Presence“ und der Herzrate, der Hautleitfähigkeit und der Hauttemperatur mit den Fragebogen-Unterskalen Gefühl von physikalischem Raum, Realismus der Texturen und Glaubwürdigkeit der Charaktere in der virtuellen Umgebung, jedoch nicht mit dem bildhaften Realismus.</p>
Kontinuierlicher subjektiver Bericht	<p>Kontinuierliches Selbstrating von Präsenzepfinden während des Aufenthalts in der virtuellen Umgebung mittels eines Schiebereglers (Ijsselsteijn & de Ridder, 1998; Freeman, Avons, Pearson & Ijsselsteijn, 1999; Freeman & Avons, 2000).</p>	<p>Durch das kontinuierliche Selbstrating konnten die Schwankungen im Präsenzepfinden gut erfasst werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Schwankungen auch innerhalb derselben Bedingung interindividuell verschieden und teilweise sehr hoch waren.</p>
Psychophysische Maße	<p>Größenschätzung als Skalierung („magnitude estimation“, Snow & Williges, 1998):</p> <p>Versuchspersonen wiesen im ersten Durchgang ihrem Telepräsenzepfinden einen beliebigen Wert zu. Alle folgenden Durchgänge und Bedingungen sollten im Vergleich zur ersten Schätzung beurteilt werden.</p> <p>Diskrimination zwischen aktueller und virtueller Umgebung (Schloerb, 1995; Sadowski & Stanney, 2002a):</p> <p>perfektes subjektives Präsenzepfinden sollte dazu führen, dass nicht zwischen der aktuellen und der virtuellen Umgebung unterschieden werden kann. Über die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Antworten auf die Frage, in welcher Umgebung man sich gerade befindet, ist das Präsenzepfinden abstufbar.</p> <p>Crossmodale Zuordnung („matching“, Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b):</p>	<p>Die Größenschätzung erwies sich als effektive Methode für die Bewertung verschiedener Bedingungen in einer virtuellen Umgebung.</p>

	In der Literatur vorgeschlagene Maße	Empirische Befunde
	Angabe der Höhe des Präsenzepfindens durch die Einstellung der Helligkeit eines Lichts, der Lautstärke von Musik etc. in einer virtuellen Umgebung.	
	Paarvergleich (Sadowski & Stanney, 2002b): Vergleich jeweils zweier virtueller Umgebungen bzw. zweier verschiedener Modifikationen einer virtuellen Umgebung hinsichtlich der Höhe des Telepräsenzepfindens.	
OBJEKTIVE MASSE		
Verhaltensmaße		
Aufgabenleistung	Koordinationsfähigkeit (Held & Durlach, 1991): Auge-Hand-Koordination als Maß für die Adaptationsfähigkeit an das System.	Die Adaptation an das System schlug fehl, wenn keine Identifikation mit dem Slaveroboter möglich war oder wenn eine vollständige Identifikation vorlag. Daher kann die Koordinationsfähigkeit nicht als alleiniges Maß für das Präsenzepfinden eingesetzt werden.
	Erinnerungsleistung bezüglich der Hintergrundmusik, die während der Erfahrung in der virtuellen Umgebung gespielt wurde (Nichols, Haldane & Wilson, 2000).	Die Erinnerungsleistung war negativ korreliert mit dem selbstberichteten Präsenzepfinden.
	Aufgabenleistung in der Nebenaufgabe, die in der aktuellen Umgebung stattfindet (z.B. Barfield & Weghorst, 1993; Darken, Bernatovich, Lawson & Peterson, 1999; Klimmt, Hartmann, Gysbers & Vorderer, 2005) zur Erfassung der kognitiven Last bzw. zur Messung des Anteils der auf die virtuelle Umgebung gerichteten Aufmerksamkeitsressourcen.	Darken, Bernatovich, Lawson & Peterson (1999) fanden einen hohen positiven Zusammenhang zwischen den auf die vermittelte Umgebung gerichteten Aufmerksamkeitsressourcen und dem selbstberichteten Präsenzepfinden. Klimmt, Hartmann, Gysbers & Vorderer (2005) hingegen konnten keinen solchen Zusammenhang finden.
	Schätzung der Dauer des Aufenthalts in der virtuellen Umgebung (Waterworth, Waterworth, Holmgren, Rimbark & Lauria, 2001; Waterworth & Waterworth, 2003; Ijsselsteijn, Bierhoff & Slangen-de Kort, 2001).	Während Waterworth, Waterworth, Holmgren, Rimbark & Lauria (2001) bzw. Waterworth & Waterworth (2003) eine positive Korrelation zwischen der Schätzung der Dauer des Aufenthalts und dem Abspielen von virtuellen Filmen fanden, postulierten Ijsselsteijn, Bierhoff & Slangen-de Kort (2001) eine negative Korrelation. Letztere Autoren konnten jedoch keinen Zusammenhang zwischen der Schätzung der Dauer des Aufenthalts in einer virtuellen Umgebung und dem Präsenzerleben finden.
Verhaltensbeobachtung	Schreckreaktion auf unerwartete oder bedrohliche Stimuli in der vermittelten Umgebung (Sheridan, 1992b; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b).	Eine stärkere Schreckreaktion ging mit einem höheren selbstberichteten Präsenzepfinden einher (Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b).
	Konflikt zwischen virtueller und aktueller Information: Während der Aufgabe in der virtuellen	Bei visueller Informationsverarbeitungspräferenz zeigte sich ein positiver

	In der Literatur vorgeschlagene Maße	Empirische Befunde
	Umgebung sollten die Probanden bei einem Signal auf ein spielendes Radio zeigen. Das Radio war virtuell an einer anderen Stelle sichtbar als in der aktuellen Umgebung hörbar. Die Autoren nahmen an, dass die Versuchspersonen bei einem höheren Präsenzepfinden eher auf die virtuell sichtbare Stelle als auf die aktuell hörbare Stelle zeigen (Slater, Usoh & Chrysanthou, 1995).	Zusammenhang zwischen objektiv erhobenem Präsenzepfinden und der Anwesenheit virtueller Schatten, bei auditiver Präferenz fand sich kein solcher Zusammenhang.
	Simulatorkrankheitsähnliche Beschwerden vor und nach der experimentellen Aussetzung in eine virtuelle Umgebung (Stanney, Kennedy, Drexler & Harm, 1999). Die Autoren erfassten dies über Zeigefehler der Benutzer als Adaptationsmessung bezüglich der virtuellen Umgebung.	Die Beschwerden der Simulatorkrankheit führten zu größeren Zeigefehlern der Benutzer, vor allem, wenn visuelle und taktile Rückmeldung nicht vorhanden waren. Da jedoch der Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Simulatorkrankheit unklar ist, ist die Tauglichkeit dieses Maßes fragwürdig.
	Bewegungsausmaß und Körperhaltung (Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001; Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001; Whalen, Noel & Stewart, 2003).	Das Bewegungsausmaß war zumeist positiv korreliert mit dem subjektiv angegebenen Präsenzepfinden, jedoch fand eine Studie ebenfalls einen negativen Zusammenhang (Mania & Chalmers, 2001).
	Sozial konditionierte Reaktion auf soziale virtuelle Begegnungen (Sheridan, 1992b).	
	Analyse der Mimik zur Emotionsmessung (Huang & Alessi, 1999).	
Physiologische Maße	Hautleitfähigkeit (Dillon, Keogh, Freeman & Davidoff, 2001; Freeman, Lessiter & Ijsselsteijn, 2001; Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001; Meehan, Razaque, Insko, Whitton & Brooks, 2005; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001; Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater, 2005).	Nicht zur Messung von Telepräsenzepfinden geeignet, jedoch zur Messung von Zusatzinformationen wie negative physische Konsequenzen (Dillon, Keogh, Freeman & Davidoff, 2001) oder Medienform (z.B. zweidimensionale vs. dreidimensionale Darstellung, Freeman, Lessiter & Ijsselsteijn, 2001) bzw. Korrelation mit selbstberichtetem Telepräsenzepfinden (Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001).
	Herzrate (Dillon, Keogh, Freeman & Davidoff, 2001; Freeman, Lessiter & Ijsselsteijn, 2001; Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001; Meehan, Razaque, Insko, Whitton & Brooks, 2005; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b; Brogni, Vinayanagamoorthy, Steed & Slater, 2005).	Nicht zur Messung von Telepräsenzepfinden geeignet, jedoch zur Erhebung von Zusatzinformationen wie Medieninhalt (Dillon, Keogh, Freeman & Davidoff, 2001; Freeman, Lessiter & Ijsselsteijn, 2001) oder Bildfrequenz (Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001) bzw. Korrelation mit selbstberichtetem Telepräsenzepfinden (Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001).
	Hauttemperatur	Nicht zur Messung von

In der Literatur vorgeschlagene Maße	Empirische Befunde
(Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001; Meehan, Razzaque, Insko, Whitton & Brooks, 2005; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001; Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater, 2005).	Telepräsenzempfinden geeignet, es konnten keine korrelativen Zusammenhänge gefunden werden (Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001).
Reflexreaktionen (Sheridan, 1994; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b).	Stärkere Reflexreaktionen auf unerwartete Stimuli gingen mit einem höheren Präsenzempfinden einher (Nichols, Haldane & Wilson, 2000).
Muskeltonus (Sadowski & Stanney, 2002a, 2002b).	
Zentralnervöse Gehirnaktivität (Whalen, Noel & Stewart, 2003).	
Endokrine Messungen, z.B. Messung von Stressindikatoren wie Cortisol- und Catecholamingehalt im Speichel (Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995; Whalen, Noel & Stewart, 2003).	

Vor allem die Fragebögen als subjektive Maße sind in der Literatur kritisiert worden. Slater (1999) beispielsweise beanstandete an dem Witmer-Singer Presence Questionnaire, dass dieser eher nach Meinungen von Versuchspersonen fragt und die Charakteristiken der virtuellen Umgebung und diejenigen des Benutzers konfundiert. Usoh, Catena, Arman & Slater (2000) untersuchten, ob der Witmer-Singer Presence Questionnaire oder der Fragebogen von Slater, Usoh & Steed (1994) zwischen aktueller und virtueller Umgebung trennen kann. Keiner der beiden Fragebögen konnte zwischen diesen beiden Umgebungen diskriminieren, lediglich bei der freien Antwortmöglichkeit beim Fragebogen von Slater, Usoh & Steed zeigte sich ein Unterschied zwischen aktueller und virtueller Umgebung. Insgesamt merken die Autoren an, dass beide Fragebögen nicht dasselbe messen, da die Interkorrelationen zwischen beiden Fragebögen insgesamt niedrig ausfielen. Eine fehlende Korrelation zwischen diesen beiden Fragebögen konnte ebenfalls von Youngblut & Huie (2003) bei einer virtuellen militärischen Missionsaufgabe bestätigt werden.

Bei den objektiven Maßen jedoch steht ebenfalls die Validität in Frage. Da ein theoretischer Rahmen zum Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und Aufgabenleistung fehlt, scheint es nicht dienlich, diese als Maß für das Präsenzempfinden zu benutzen. Selbst bei einer hohen Korrelation ist eine direkte Verbindung zwischen diesen beiden Konzepten nicht garantiert, es wäre durchaus möglich, dass lediglich dieselben Prozesse sowohl am Präsenzempfinden als auch an der Aufgabenleistung beteiligt sind. Zudem ergaben sich hier in der Literatur widersprüchliche Befunde bezüglich des Zusammenhangs zum subjektiv berichteten Präsenzempfinden (s. Unterkapitel 2.5.).

Bei den physiologischen Messmethoden werden vor allem Maße vorgeschlagen, die eine Stressreaktion messen. Auch hier steht die Validität in Frage, da für eine Stressreaktion bei einer Aussetzung in eine vermittelte Umgebung viele Faktoren verantwortlich sein können und daher nicht zwingend das Präsenzempfinden erfassen.

Das Präsenzepfinden stellt jedoch einen subjektiven Zustand dar, daher erscheint es sinnvoll, dieses mit subjektiven Maßen zu ermitteln. Da der Präsenzfragebogen von Scheuchenpflug (2001) der bislang einzig deutschsprachige validierte Fragebogen ist, werden in der vorliegenden Arbeit vorwiegend Teile dieses Fragebogens zur subjektiven Messung des Präsenzepfindens eingesetzt. Der Fragebogen nebst Kennwerten für die einzelnen Items ist im Anhang A zu finden. Für diese Arbeit wurden jeweils nur die trennscharfen Items verwendet. Da in der vorliegenden Arbeit nicht konzeptionell zwischen virtueller und entfernter Umgebung unterschieden wird, kommt der Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) auch bei Telepräsenzsystemen mit einer entfernten Umgebung zum Einsatz.

2.4. Empirisch ermittelte Komponenten von Präsenzepfinden

In der Forschung zum Präsenzepfinden wurden bisher eine Vielzahl von möglichen Komponenten dieses Konzepts untersucht und identifiziert. Da bislang weitgehend ein theoretischer Rahmen für das Präsenzkonstrukt fehlt, stehen die untersuchten Komponenten verhältnismäßig unverbunden nebeneinander (Sacau, Gouveia, Ribeiro, Gouveia & Biocca, 2003).

Die empirisch untersuchten Komponenten können grob gegliedert werden in Persönlichkeitseigenschaften und –variablen, Kommunikationsvariablen und Informationen aus der entfernten Umgebung. Ebenso wurden die Einflüsse der jeweiligen Aufgabe sowie die Einflüsse von Störungen aus der aktuellen Umgebung untersucht.

Im Unterkapitel 2.2. wurden motivationale, kognitive, perzeptuelle und affektive Komponenten des Präsenzepfindens postuliert. Eine interessante Metaanalyse von Timmins & Lombard (2005) untermauert die Annahme dieser Teilkomponenten. Die Autoren untersuchten „inverses Präsenzepfinden“, d.h. die Illusion, dass eine nicht vermittelte aktuelle Erfahrung als mediiert erlebt wird. Sie konnten drei Kategorien identifizieren, die motivational, kognitiv, perzeptuell und affektiv beeinflusst waren: Ereignisse, die entweder sehr positiv (z.B. Wahrnehmung wunderschöner Landschaftsbilder), sehr negativ (z.B. Wahrnehmung und Partizipation an Tragödien) oder unüblich (z.B. Déjà-vu-Erlebnisse in der aktuellen Umgebung aus der vermittelten Umgebung) sind. Im Folgenden werden die empirisch ermittelten Beiträge aus Benutzersicht nach kognitiven, motivationalen, affektiven und perzeptuellen Gesichtspunkten gegliedert.

Zunächst wird auf den empirisch ermittelten Beitrag der Persönlichkeitseigenschaften („trait“) zum Präsenzepfinden eingegangen. Bei der darauf folgenden Abhandlung des Zusammenhangs zwischen Persönlichkeitsvariablen („state“) und dem Präsenzepfinden kommt neben den motivationalen, kognitiven und affektiven Bestandteilen zusätzlich eine motorische Komponente hinzu, die sich in empirischen Untersuchungen ebenfalls als relevant für das Präsenzepfinden herausgestellt hat.

Das aus Benutzersicht perzeptuelle Element des Präsenzepfindens kann unterteilt werden in sensorische und sensomotorische Bestandteile. Diese sind den Kommunikationsvariablen und den Informationen aus der vermittelten Umgebung zuzuordnen. Nach Selverian & Hwang (2003) kann dabei unterschieden werden zwischen statischen Informationen („one-way-sensory“) und dynamischen Informationen aus der vermittelten Umgebung („two-way-

interactive“). Diese empirisch ermittelten Komponenten des Präsenzempfindens werden im Anschluss an die Persönlichkeitseigenschaften und –variablen behandelt.

2.4.1. Persönlichkeitseigenschaften („traits“)

Beim Fünffaktorenmodell der Persönlichkeit werden fünf Faktoren angenommen, die der Persönlichkeit als Grundeigenschaften zugrunde liegen („big five“; Norman, 1963; McCrae & Costa, 1983; Costa & McCrae, 1985; Fiske, 1949; Peabody & Goldberg, 1989). Die Fünffaktorenstruktur der Persönlichkeit konnte validiert und bestätigt werden (McCrae & Costa, 1987). Es handelt sich um folgende fünf Faktoren, die in der Forschung z.T. unterschiedliche Bezeichnungen haben (Originalbezeichnungen nach McCrae & Costa (1983) in Klammern und Anführungsstrichen):

- I Extraversion („extraversion“; Eigenschaften: Geselligkeit, Schüchternheit, Impulsivität),
- II Verträglichkeit („agreeableness“; Eigenschaften: Wärme, Hilfsbereitschaft, Toleranz),
- III Gewissenhaftigkeit („conscientiousness“; Eigenschaften: Ordentlichkeit, Beharrlichkeit, Zuverlässigkeit),
- IV Emotionale Stabilität vs. Neurotizismus („neuroticism“; Eigenschaften: Nervösität, Erregbarkeit, Ängstlichkeit),
- V Offenheit für Erfahrungen („openness to experience“; Eigenschaften: Gebildetheit, Kreativität, Gefühl für Kunst, Intellekt).

Sacau, Laarni, Ravaja & Hartmann (2005) untersuchten, ob diese fünf Persönlichkeitsfaktoren zum Präsenzempfinden beitragen. Der einzige signifikante Faktor war Verträglichkeit („agreeableness“). Insgesamt trugen die fünf Persönlichkeitsfaktoren nur sehr wenig zum Präsenzempfinden bei. Daraus lässt sich schließen, dass hauptsächlich formale Faktoren und nicht Persönlichkeitseigenschaften zum Präsenzempfinden beitragen und dieses eher einen Moment-zu-Moment – Zustand darstellt.

Das Dreifaktorenmodell von Eysenck (1947, 1975) geht von drei Faktoren der Persönlichkeit aus. Dabei sind die beiden Faktoren „Extraversion“ und „Neurotizismus“ deckungsgleich mit dem Fünffaktorenmodell, bei Eysenck kommt als dritter Persönlichkeitsfaktor „Psychotizismus“ hinzu. Diese Dimension bezeichnet die Neigung zu psychotischen Erkrankungen.

Jurnet, Beciu & Maldonado (2005) untersuchten den Einfluss dieser drei Persönlichkeitsfaktoren auf das Präsenzempfinden. Die Autoren berichten von einer negativen Korrelation zwischen der Extraversionsskala und dem Präsenzempfinden, d.h. introvertierte Personen wiesen einen höheren Wert für das Präsenzempfinden auf als extravertierte Personen.

Dieser Befund steht im Widerspruch zu den Befunden von Sacau, Laarni, Ravaja & Hartmann (2005), die keinen solchen Zusammenhang zur Extraversionsskala beim Fünffaktorenmodell gefunden hatten.

2.4.2. Persönlichkeitsvariablen („states“)

Persönlichkeitsvariablen stellen Oberflächenmerkmale von Personen dar, die sich durch die Umgebung bzw. die Umstände verändern oder die aus den Grundfaktoren zusammengesetzt

sind. Für eine Reihe von Persönlichkeitsvariablen wurde der Zusammenhang zum Präsenzepfinden untersucht. Dabei wurden sowohl kognitive, motivationale, affektive als auch motorische Komponenten betrachtet. Die folgende Tabelle 2.03 stellt die untersuchten Persönlichkeitsvariablen samt deren empirisch ermittelten Bezug zum Präsenzepfinden dar. Ein positiver Beitrag der Variablen zum Präsenzepfinden wird in der Tabelle mit einem $+$ – Symbol gekennzeichnet, ein eingeschränkt positiver Beitrag mit einem kleinen $+$ – Symbol, ein negativer Beitrag mit einem $-$ - Symbol. Wurde kein Zusammenhang zwischen der Variablen und dem Präsenzepfinden aufgefunden, wird dies mit einem \emptyset – Symbol dargestellt.

TABELLE 2.03. Empirisch untersuchte Zusammenhänge zwischen Persönlichkeitsvariablen und Präsenzepfinden.

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
<i>Kognitiv beeinflusste Persönlichkeitsvariablen</i>		
Aufmerksamkeitszuweisung / Situationsbewusstsein	$+$ Aufmerksamkeitszuweisung auf eine Nebenaufgabe in der aktuellen Umgebung. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Es konnte eine hohe Korrelation zwischen subjektivem Präsenzepfinden und der Aufmerksamkeitszuweisung auf die virtuelle Umgebung gefunden werden. 	Darken, Bernatovich, Lawson & Peterson (1999)
	$+$ Aufmerksamkeitszuweisung und Situationsbewusstsein: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Aufmerksamkeitszuweisung, jedoch nicht das Situationsbewusstsein bei einer Aufgabe in virtueller Umgebung, trug signifikant zum Präsenzepfinden bei. 	Riley, Kaber & Draper (2004)
	\emptyset Reaktionszeit in der Nebenaufgabe in der aktuellen Umgebung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Reaktionszeit in der Nebenaufgabe zeigte keinen Zusammenhang zum Präsenzepfinden. 	Klimmt, Hartmann, Gysbers & Vorderer (2005)
Räumliches Vorstellungsvermögen / räumliche Wahrnehmung	$+$ Faktorenanalytische Untersuchung eines selbstkonstruierten Fragebogens: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefühl von physikalischem Raum in einer virtuellen Umgebung wurde als der Faktor mit der höchsten Ladung extrahiert. 	Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff (2001)
	$+$ Faktorenanalytische Untersuchung eines Fragebogens mit 75 Fragen, zusammengesetzt aus dem Witmer-Singer-Presence-Questionnaire und anderen Items: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Räumliches Präsenzepfinden wurde als der Faktor mit der höchsten Ladung extrahiert. 	Schubert, Friedmann & Regenbrecht (2001)
	$+$ Möglichkeit der Interaktion mit einer virtuellen Umgebung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Möglichkeit bzw. sogar die Illusion der Interaktion erhöhte speziell das räumliche Präsenzepfinden. 	Regenbrecht & Schubert (2002)
	$+$ Test zur mentalen Rotation: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mittelhohe positive Korrelation zwischen Fähigkeit in mentaler Rotation und Präsenzepfinden. 	Jurnet, Beciu & Maldonado (2005)
	$+$ Messung der visuellen Extraktion von Invarianten zur Wahrnehmung der räumlichen Struktur (Gibson, 1979) mittels Messung der Augenbewegungen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Visuelle Extraktion von Invarianten als signifikanter Prädiktor für das Präsenzepfinden. 	Renaud, Chartier, Albert, Décarie, Cournoyer & Bouchard (2007)
	\emptyset Messung von räumlichem Verständnis mittels virtueller Landmarkenidentifikation und Landkartenerstellung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Zusammenhang zwischen räumlichem Verständnis und Präsenzepfinden. 	Darken, Bernatovich, Lawson & Peterson (1999)

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzempfinden	Referenz
⊖	Messung vom Vorstellungsvermögen räumlicher visueller Bilder mittels Fragebogen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Zusammenhang zwischen räumlichem visuellen Vorstellungsvermögen und Präsenzempfinden. 	Sacau, Laarni, Ravaja & Hartmann (2005)
⊖	Test zum räumlichen Orientierungsvermögen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Zusammenhang zwischen räumlichem Orientierungsvermögen und Präsenzempfinden. ▪ Höhere Werte für räumliches Orientierungsvermögen bei Männern als bei Frauen. 	Zimmons & Panter (2003)
+	Untersuchung der Auswirkung von Präsenzempfinden auf die visuelle räumliche Wahrnehmung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Positive Korrelation zwischen Präsenzempfinden und visueller räumlicher Wahrnehmung. ▪ Präsenzempfinden führt zu einer Korrektur der verzerrten Distanzhinweise, die typischerweise in einer virtuellen Umgebung auftreten. 	Hofmann, Jäger, Deffke & Bubb (2001)
Informationsverarbeitungspräferenz / kognitiver Stil	+ Repräsentationspräferenz als visuelle, auditive oder kinästhetische Dominanz bei der Informationsverarbeitung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine hohe visuelle Informationsverarbeitungspräferenz führt zu höherem Präsenzempfinden, eine hohe auditive Präferenz zu niedrigerem Präsenzempfinden. ▪ Mit einem virtuellen Körper führt eine hohe kinästhetische Präferenz zu höherem Präsenzempfinden, ohne virtuellen Körper führt eine hohe kinästhetische Präferenz zu niedrigerem Präsenzempfinden. ▪ Eine Präferenz der Schilderung der Erfahrung in der ersten Person führt zu höherem Präsenzempfinden. ▪ Bei visueller Informationsverarbeitungspräferenz zeigte sich ein positiver Zusammenhang zwischen objektiv erhobenem Präsenzempfinden und der Anwesenheit virtueller Schatten, bei auditiver Präferenz fand sich kein solcher Zusammenhang. 	Slater & Usoh (1993a, 1993b), Slater, Usoh & Steed (1994), Slater, Usoh & Chrysanthou (1995)
+	+ Abstraktionsgrad von realen und virtuellen Filmen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Präsenzempfinden war bei den konkreten Filminhalten höher, unabhängig davon, ob der Film real oder virtuell war. ▪ Für virtuelle Filme zeigte sich ein positiver korrelativer Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und geschätzter Dauer (je höher das Präsenzempfinden, desto länger wurde die Dauer des Films geschätzt), für reale Filme gab es keinen solchen Zusammenhang. 	Waterworth, Waterworth, Holmgren, Rimbark & Lauria (2001), Waterworth & Waterworth (2003)
⊖	⊖ Kognitiver Stil als Stärke der Präferenz für die Art der Informationsverarbeitung, basierend auf der Typologie von Jung (1971): <ul style="list-style-type: none"> ➢ Extraversion vs. Introversion, ➢ Sensitivität vs. Intuition, ➢ Denken vs. Fühlen, ➢ Urteilen vs. Wahrnehmen. ▪ Positiver, jedoch nicht signifikanter Zusammenhang zwischen Präsenzempfinden und kognitivem Stil; höchste Korrelation mit „Wahrnehmen“. 	Sas & O’Hare (2001)
+	+ Kognitiver Stil als Stärke der Präferenz für die Art der Informationsverarbeitung, basierend auf der Typologie von Jung (1971): <ul style="list-style-type: none"> ▪ Positiver Zusammenhang zwischen „Fühlen“ und Präsenzempfinden. ▪ Positiver Zusammenhang zwischen „Sensitivität“ und Präsenzempfinden. ▪ Positiver, jedoch nicht signifikanter Zusammenhang zwischen „Introversion“ und Präsenzempfinden. 	Sas, O’Hare & Reilly (2004)

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz	
⊖	Kognitiver Stil als Präferenz für verbale oder visuelle Informationsverarbeitung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Zusammenhang zwischen kognitivem Stil und Präsenzepfinden. 	Jurnet, Beciu & Maldonado (2005)	
+	Kognitiver Stil zum einen als „thematische Trägheit“ als Tendenz, nach einer vermittelten Erfahrung durch Schemaaktivierung eine vermittelte Erfahrung mit einem ähnlichen Thema aufzusuchen und zum anderen als Integration von für die Geschichte irrelevanten Informationen (z.B. Hintergrundmusik, Beschreibung): <ul style="list-style-type: none"> ▪ Integration von irrelevanten Informationen als signifikanter Prädiktor für die selbstberichtete Wichtigkeit von Präsenzepfinden. ▪ Thematische Trägheit zeigte keinen Zusammenhang zur selbstberichteten Wichtigkeit von Präsenzepfinden. 	Nunez & Blake (2005)	
Selbstrepräsentation / Identifikation mit dem Slaveroboter bzw. Avatar / Präsentation anderer Akteure	+	Identifikation des eigenen Körpers mit dem Slaveroboter, gemessen über Adaptation an das System: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktives Bahntracking erhöhte die Adaptationsleistung gegenüber passivem Bahntracking, wobei auch bei passivem Bahntracking Adaptation vorhanden war. 	Held & Durlach (1991)
	+	Selbstrepräsentation mittels Anwesenheit eines virtuellen Körpers: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nur Personen mit hoher kinästhetischer Informationsverarbeitungspräferenz zeigen ein höheres Präsenzepfinden bei der Anwesenheit eines virtuellen Körpers. ▪ Die Identifikation mit dem virtuellen Körper war nur dann positiv korreliert mit dem Präsenzepfinden, wenn die Versuchspersonen sich selber bewegten. ▪ Der virtuelle Körper sollte ein dem Benutzer ähnliches visuelles Erscheinungsbild aufweisen (anthropomorpher Ansatz). 	Slater & Usoh (1993a, 1993b), Slater, Usoh & Steed (1994, 1995)
	+	Variation des anthropomorphen Erscheinungsbild eines anderen Agenten in der virtuellen Umgebung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Präsenzepfinden war erhöht, wenn der andere Akteur bildlich dargestellt wurde im Vergleich zu einer fehlenden bildlichen Darstellung des Anderen. ▪ Das Präsenzepfinden war bei einem Akteur, der weniger anthropomorph dargestellt wurde, höher als bei einem solchen, der stärker anthropomorph war. Die Autoren erklären dies mit der erhöhten Erwartungshaltung bei einer stark anthropomorphen Darstellung des anderen Akteurs, die dann enttäuscht wurde. 	Nowak & Biocca (2001, 2003)
	⊖	Vergleich von Präsenzepfinden und Aufgabenleistung bei einem computergenerierten Avatar mit der bei der Projektion der Hände des Benutzers in die virtuelle Umgebung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Obwohl die Probanden bei freier Antwortmöglichkeit angaben, die Projektion zu bevorzugen, zeigte sich kein Effekt des Avartartyps auf das Präsenzepfinden. 	Lok, Naik, Whitton & Brooks (2004)
	+	Darstellung von anderen Akteuren: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Darstellung eines anderen Akteurs, mit dem sich der Benutzer identifizieren konnte (z.B. eine bekannte Person), erhöhte das Präsenzepfinden. 	Basil (2001)
Adaptabilität	-	Adaptabilität als Geschwindigkeit, mit der sich Personen an neue Umstände anpassen können: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe negative Korrelation zwischen Adaptabilität und Präsenzepfinden. 	Slater & Usoh (1993c)
Absorption	+	Absorption als Ausmaß, mit dem man sich in Ereignisse oder Objekte vertieft: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mittlere positive Korrelation zwischen Absorption und Präsenzepfinden. 	Sas & O'Hare (2001, 2003)

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
Kreative Vorstellungskraft	<p>+</p> <p>Kreative Vorstellungskraft als Fähigkeit, sich Szenen und Situationen lebhaft vorstellen zu können:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mittlere bis hohe positive Korrelation zwischen Absorption und Präsenzepfinden. 	Sas & O'Hare (2001, 2003)
Motivational beeinflusste Persönlichkeitsvariablen		
Übung / Erfahrung	<p>+</p> <p>Erfahrung mit Ratingfragen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorherige Ratings sensitivierten den Benutzer für verschiedene Merkmale der virtuellen Umgebung, was zu einer anderen Beurteilung des Präsenzepfindens führte. 	Freeman, Avons, Pearson & Ijsselsteijn (1999)
	<p>+</p> <p>Gewöhnung an eine virtuelle Umgebung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei virtuellen Konferenzen wurde das Präsenzepfinden nach der Gewöhnung an dieses Szenario erhöht. 	Anderson, Ashraf, Douthier & Jack (2001)
	<p>+</p> <p>Erfahrungen, die in einer virtuellen Umgebung gemacht werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wiederholte äquivalente Erfahrungen in einer virtuellen Umgebung erhöhten das Präsenzepfinden. 	Marsh (2001)
	<p>⊖</p> <p>Erfahrungen, die in einer virtuellen Umgebung gemacht werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wiederholte äquivalente Erfahrungen zeigten keinen Einfluss auf das Präsenzepfinden. 	Retaux (2003), Welch, Blackmon, Liu, Mellers & Stark (1996)
	<p>+</p> <p>Erfahrung mit der Aufgabe in einer virtuellen Umgebung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfahrung mit der Aufgabe, hier Schach, führte zu einem höheren Präsenzepfinden. 	Slater, Linakis, Usoh & Kooper (1996)
	<p>-</p> <p>Mehrfache Aussetzung in eine virtuelle Umgebung zur Übung einer manipulativen Aufgabe:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sowohl das subjektive Präsenzepfinden als auch die physiologisch erhobenen Maße (Herzrate, Hautleitfähigkeit, Hauttemperatur) verringerten sich mit zunehmender Anzahl der Kontakte mit der virtuellen Umgebung. 	Meehan, Insko, Whitton & Brooks (2001), Meehan, Razaque, Insko, Whitton & Brooks (2005)
	<p>⊖</p> <p>Variation der Länge des Kontakts in einer virtuellen Umgebung mit manipulativen Aufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Längere Kontaktdauer beeinflusste das Präsenzepfinden nicht. 	Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy (2002)
	<p>⊖</p> <p>Computererfahrung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Es fand sich kein Effekt der Computererfahrung auf das Präsenzepfinden. 	Jurnet, Beciu & Maldonado (2005)
	<p>+</p> <p>Erfahrung mit 3D-Computerspielen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nur die Häufigkeit des Spielens, nicht jedoch die Erfahrung, hatte einen Einfluss auf die selbstberichtete Wichtigkeit von Präsenzepfinden. 	Nunez & Blake (2005)
	<p>⊖</p> <p>Erfahrung mit 3D-Computerspielen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Es konnte kein Unterschied zwischen Personen mit unterschiedlichem Ausmaß an Erfahrung mit 3D-Spielen bezüglich des Präsenzepfindens gefunden werden. 	Mania & Chalmers (2001)
Immersive Tendenz / Bereitschaft, sich in einer vermittelten Umgebung präsent zu fühlen	<p>+</p> <p>Bereitschaft, Präsenzepfinden zu erleben („commitment“) bei gleichzeitiger willentlicher Unterdrückung von Zweifeln:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Diese beiden Konzepte erwiesen sich als wichtige Determinanten von Präsenzepfinden. 	Slater & Usoh (2003a, 2003b), Barfield & Hendrix (1995a, 1995b), Kim & Biocca (1997)
	<p>+</p> <p>Bereitschaft, Präsenzepfinden zu erleben:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Diese Bereitschaft erwies sich als stärkster Faktor (45% aufgeklärte Varianz) beim Präsenzepfinden. 	Sas & O'Hare (2003)

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
	<p>+ Immersive Tendenz als Persönlichkeitseigenschaft, die die Bereitschaft kennzeichnet, sich in eine vermittelte Umgebung hineinzusetzen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die immersive Tendenz zeigt einen hohen Einfluss auf das Präsenzepfinden. 	Scheuchenpflug (2001), Schubert, Friedmann & Regenbrecht (2001), Jerome & Witmer (2002), Renaud, Chartier, Altert, Decaire, Cournoyer & Bouchard (2007), Blake, Casanueva & Nunez (2000)
Involviertheit / Engagement	<p>+ Involviertheit des Benutzers:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Involviertheit beeinflusste das Präsenzepfinden direkt. 	Schubert, Friedmann & Regenbrecht (2001), Jerome & Witmer (2002)
	<p>+ Aktive Involviertheit des Benutzers:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktive Involviertheit trug direkt zum Präsenzepfinden bei. 	Renaud, Chartier, Albert, Decaire, Cournoyer & Bouchard (2007)
	<p>+ Faktorenanalytische Untersuchung eines selbstkonstruierten Fragebogens:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Involviertheit bzw. Engagement wurde als Faktor extrahiert. 	Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff (2001)
Negative Effekte: Simulator- und Bewegungs-krankheit („simulator / motion sickness“)	<p>∅ Simulatorkrankheit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mit stärkeren Symptomen der Simulatorkrankheit ging ein erniedrigtes Präsenzepfinden einher, jedoch ist dieser Zusammenhang vermutlich auf Drittvariablen (z.B. Displayoptik, Latenzzeit) zurückzuführen. 	Nichols, Haldane & Wilson (2000)
	<p>- Simulatorkrankheit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulatorkrankheit beeinträchtigte das Präsenzepfinden direkt. 	Jerome & Witmer (2002), Durlach, Fowlkes & Metevier (2005), Nichols, Haldane & Wilson (2000)
	<p>- Faktorenanalytische Untersuchung eines selbstkonstruierten Fragebogens:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Negative Effekte wie Symptome der Simulatorkrankheit wurde als Faktor extrahiert. 	Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff (2001)
	<p>∅ Simulatorkrankheit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Symptome der Simulatorkrankheit verstärkten sich mit zunehmender Dauer des Aufenthalts in der virtuellen Umgebung, dies hatte jedoch keinen Effekt auf das Präsenzepfinden. 	Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy (2002)
	<p>∅ Bewegungs-krankheit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Es konnte nur ein leicht negativer, nicht signifikanter Zusammenhang zwischen Bewegungs-krankheit und Präsenzepfinden gefunden werden. 	Mania & Chalmers (2001)
Affektiv beeinflusste Persönlichkeitsvariablen		
Testängstlichkeit	<p>+ Testängstlichkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ In virtuellen Szenarien, die Testängstlichkeit evozierten, erhöhten diese das Präsenzepfinden. 	Jurnet, Beciu & Maldonado (2005)
	<p>+ Angsteinflößende virtuelle Umgebung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Präsenzepfinden erhöhte sich in affektiv evozierenden Umgebungen, jedoch wurde der emotionale Zustand ebenso von der Höhe des Präsenzepfindens beeinflusst. 	Riva, Mantovani, Capdeville, Preziosa, Morganti, Villani, Gaggioli, Botella & Alcaniz (2007)

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
Erfahrung von persönlicher Gefahr bzw. Risiko in einer vermittelten Umgebung	<p>+ Gefühl der persönlichen Gefahr:</p> <ul style="list-style-type: none"> Das Gefühl der persönlichen Gefahr in einer virtuellen Umgebung führte zu einem erhöhten Präsenzepfinden. 	Slater & Usoh (1993a)
Risiko in einer vermittelten Umgebung	<p>⊖ Virtuelles persönliches Risiko:</p> <ul style="list-style-type: none"> Es konnte kein Effekt auf das Präsenzepfinden gefunden werden. 	Snow & Williges (1998)
Vergnügen / Freude an einer vermittelten Umgebung	<p>+ Vergnügen, in einer virtuellen Umgebung zu sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> Das Ausmaß an Vergnügen hing positiv mit dem Präsenzepfinden zusammen. 	Barfield & Weghorst (1993), Barfield & Hendrix (1995a, 1995b), Usoh, Catena, Arman & Slater (2000), Mania (2001), Marsh (2001), Nichols, Haldane & Wilson (2000)
	<p>+ Präsenzmaximierungsstrategien von Benutzern:</p> <ul style="list-style-type: none"> Benutzer (hier v.a. Spieler von 3D-Spielen) besitzen Präsenzmaximierungsstrategien (z.B. Ausblendung der realen Umgebung), um das Vergnügen am Spielen zu gewährleisten. 	Nunez & Blake (2005)
Evozieren von emotionalen Reaktionen	<p>+ Emotionale Reaktionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die emotionale Reaktion zeigte nur dann einen Effekt auf das Präsenzepfinden, wenn der Inhalt relevant war und die Stimuli anregend waren. 	Dillon, Keogh, Freeman & Davidoff (2001), Freeman, Lessiter, Pugh & Keogh (2005), Riva, Mantovani, Capideville, Preziosa, Morganti, Villani, Gaggiolo, Botella & Alcaniz (2007)
<i>Affektiv-kognitiv beeinflusste Persönlichkeitsvariablen</i>		
Empathie	<p>+ Empathie als kognitive Fähigkeit, die Sichtweise eines anderen zu übernehmen und die affektiven Reaktionen des anderen zu erleben:</p> <ul style="list-style-type: none"> Mittelhoher Zusammenhang zwischen Empathie und Präsenzepfinden. 	Sas & O'Hare (2001, 2003), Marsh (2001), Nicovich, Boller & Cornwell (2005)
<i>Motorisch beeinflusste Persönlichkeitsvariablen</i>		
Aktivität / Eigenbewegung / Navigation mit Eigenbewegung	<p>+ Ausmaß an Eigenbewegung in einer virtuellen Umgebung mit Navigation:</p> <ul style="list-style-type: none"> Das Ausmaß der Eigenbewegung war positiv korreliert mit dem Präsenzepfinden. 	Slater & Usoh (1993a), Slater, Steed, McCarthy & Maringelli (1998), Slater, Usoh & Steed (1995), Regenbrecht & Schubert (2002)
	<p>+ Faktorenanalytische Untersuchung eines eingesetzten Fragebogens:</p> <ul style="list-style-type: none"> Navigation innerhalb der virtuellen Umgebung wurde als Faktor extrahiert. 	Barfield & Hendrix (1995b)
	<p>+ Bewegungskontrolle des Benutzers:</p> <ul style="list-style-type: none"> Bewegungskontrolle erhöhte das Präsenzepfinden. Bereitstellung von Rotationsbewegungen erhöhte das Präsenzepfinden. 	Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy (2002)
	<p>+ Aktivität in der virtuellen Umgebung:</p> <ul style="list-style-type: none"> Aktivität und Präsenzepfinden korrelierten positiv. 	Retaux (2003)

Persönlichkeitsvariable	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
-	Navigation in der vermittelten Umgebung: ▪ Weniger Navigation führte zu einem höheren Präsenzepfinden.	Mania & Chalmers (2001)

Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, dass die Befunde für die Persönlichkeitsvariablen sehr uneinheitlich sind. Zum einen werden einige Komponenten zwar gleich benannt, jedoch unterschiedlich definiert. Zum anderen ergeben sich auch innerhalb derselben Konzepte unterschiedliche Ergebnisse, was deren Beitrag zum Präsenzepfinden betrifft.

Einheitlich positive Beiträge zum Präsenzepfinden wurden für die Variablen Verträglichkeit, Involviertheit bzw. Engagement, Testängstlichkeit, Empathie, immersive Tendenz bzw. Absorption und Vergnügen an einer vermittelten Umgebung gefunden. Hier handelt es sich vor allem um affektive und motivationale Komponenten. Bei Telepräsenz Anwendungen sollte der Benutzer daher affektiv und motivational stark eingebunden werden, um dessen Präsenzepfinden zu erhöhen. Bei solchen Systemen sollte ebenfalls eine Relevanz für den Benutzer bestehen, um durch das Evozieren von emotionalen Reaktionen das Präsenzepfinden zu steigern.

Für kognitive Komponenten hingegen zeigten sich eher inkonsistente Befunde. Das räumliche Vorstellungsvermögen, die Aufmerksamkeitszuweisung, die Informationsverarbeitungspräferenz bzw. der kognitive Stil und die Selbstrepräsentation in einer vermittelten Umgebung sind stärker von der Aufgabe und den Anforderungen abhängig als die motivationalen bzw. affektiven Komponenten. Da für den Benutzer etwaige Schwächen bei den kognitiven Bestandteilen ebenfalls in der natürlichen Umwelt existieren und nicht auf vermittelte Umgebungen beschränkt sind (z.B. schlechte dreidimensionale Wahrnehmung und daraus resultierend ein eingeschränktes räumliches Vorstellungsvermögen), ist wahrscheinlich, dass bereits Strategien vom Benutzer entwickelt wurden, um diese Schwächen auszugleichen. Es ist anzunehmen, dass dann dieselben Strategien auf die Erfahrung in der vermittelten Umgebung transferiert werden. Wenn dieser Transfer erfolgreich ist, sollte sich kein Zusammenhang für die kognitiven Variablen zum Präsenzepfinden zeigen. Erst, wenn dieser Strategietransfer nicht gelingt, sollten sich die kognitiven Schwächen auswirken, Benutzer mit einer hohen Ausprägung bei der jeweiligen kognitiven Variablen benötigen für diese keine Kompensationsstrategien im Unterschied zu Benutzern mit einer niedrigen Ausprägung, die Beziehung zwischen der kognitiven Variablen und dem Präsenzepfinden erscheint dann positiv. Welche Variablen jedoch dazu beitragen, dass ein positiver Transfer von Kompensationsstrategien auf Erfahrungen in einer vermittelten Umgebung stattfinden kann, wurde bislang nicht untersucht. Hier sind durchaus eine Moderation durch motivationale oder affektive Komponenten bzw. weit komplexere Zusammenhänge denkbar. Ebenfalls ist wahrscheinlich, dass Aufgaben- und Anforderungskomponenten an dem Strategietransfer beteiligt sind.

Die motorische Komponente, d.h. die Aktivität bzw. Eigenbewegung in einer vermittelten Umgebung sowie die Übung resp. Erfahrung stellen in der Auflistung Sonderfälle dar. Hier scheint zusätzlich zu der Aufgaben- und Anforderungsabhängigkeit eine interindividuell

unterschiedliche Komponente beteiligt zu sein. Die Befunde, nach denen sowohl positive, negative als auch fehlende Zusammenhänge zum Präsenzepfinden gefunden wurden, deuten darauf hin, dass diese beiden Variablen unterschiedlich auf die Benutzer wirken. Es ist möglich, dass Benutzer interindividuell verschieden mit zunehmender Übung ein verstärktes, vermindertes oder gleich bleibendes Präsenzepfinden erleben. Auch die Aktivität könnte für verschiedene Benutzer eine unterschiedliche Relevanz besitzen. Durch welche Variablen die Richtung der Reaktion des Benutzers bezüglich des Präsenzepfindens moderiert oder bestimmt wird, bleibt jedoch unklar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vor allem affektive und motivationale Persönlichkeitsvariablen zum Präsenzepfinden beitragen und der Benutzer daher möglichst stark affektiv und motivational eingebunden werden sollte. Bei den kognitiven Variablen ist darauf zu achten, dass Benutzer eventuelle Schwächen durch Anwendung von vorher gelernten Strategien in einer vermittelten Umgebung kompensieren können. Bei den Variablen Aktivität bzw. Eigenbewegung sowie Übung und Erfahrung mit einer vermittelten Umgebung sollte beobachtet werden, welche Tendenz bei der Veränderung des Präsenzepfindens interindividuell vorherrscht. Zu diesen Gesichtspunkten wurden jedoch bislang keine systematischen Untersuchungen durchgeführt.

2.4.3. Kommunikationsvariablen und Informationen aus der vermittelten Umgebung¹

Die aus Benutzersicht empirisch ermittelten sensorischen und sensomotorischen Komponenten des Präsenzepfindens sind die Kommunikationsvariablen, die Informationen aus der entfernten Umgebung sowie Eigenschaften der Aufgabe und Störungen aus der aktuellen Umgebung. Über die Kommunikationsvariablen und Informationen aus der vermittelten Umgebung erhält der Benutzer sensorische Eindrücke, manipulative und Navigationsaufgaben erfordern sensomotorische Handlungen. Störungen aus der aktuellen Umgebung ziehen Aufmerksamkeitsressourcen aus der vermittelten Umgebung ab. Die folgende Tabelle stellt die empirisch untersuchten Zusammenhänge zwischen sensorischen und sensomotorischen Faktoren mit dem Präsenzepfinden zusammen. Ein positiver, eingeschränkt positiver, negativer bzw. fehlender Zusammenhang der jeweiligen Variablen mit dem Präsenzepfinden wird mit denselben Symbolen wie in der vorangegangenen Tabelle 2.03 markiert.

¹ Besonderer Dank geht an meine studentische Hilfskraft Neval Kapan für die Hilfe bei der Durchsicht der Literatur.

TABELLE 2.04. Empirisch untersuchte Zusammenhänge zwischen sensorischen bzw. sensomotorischen Faktoren und Präsenzepfinden.

Sensorische und sensomotorische Faktoren	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
Auflösung der dargebotenen Informationen (sensorische Tiefe)	<p>+</p> <p>Visuelle Auflösung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auflösung und Präsenzepfinden waren positiv korreliert. 	Slater & Usoh (1993a, 1993b), Snow & Williges (1998), Usoh, Catena, Arman & Slater (2000)
Rückgemeldete Modalitäten (sensorische Breite) / Sensorische Rückmeldung aus der vermittelten Umgebung	<p>+</p> <p>Multimodale Rückmeldung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Präsenzepfinden war höher bei visueller, auditiver und haptischer Rückmeldung als bei bimodaler Rückmeldung (alle Kombinationen), dieses wiederum war höher als bei unimodaler Rückmeldung. 	Hecht, Reiner & Halevy (2005)
	<p>+</p> <p>Untersuchung des Zusammenhangs zwischen auditivem Präsenzepfinden und psychologischen Faktoren der Geräuschwahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Informationsgehalt des Geräusches, Geräuschlokalisierung und Schalldruckpegel wurden als bestimmende Faktoren des auditiven Präsenzepfindens gefunden. 	Ozawa, Chujo, Suzuki & Sone (2003), Mitsuki, Miyasaka & Ozawa (2005)
	<p>+</p> <p>Visuelle und auditive Rückmeldung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche auditive Rückmeldung verbesserte das Präsenzepfinden, jedoch wurde die realistische Wahrnehmung der virtuellen Umgebung stärker durch die visuelle Rückmeldung beeinflusst. 	Hendrix & Barfield (1996b)
	<p>+</p> <p>Rückmeldung von Geräuschen aus der vermittelten Umgebung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine zusätzliche Rückmeldung von Geräuschen aus der vermittelten Umgebung erhöhte das Präsenzepfinden. 	Snow & Williges (1998), Hendrix & Barfield (1995), Hendrix & Barfield (1996b), Darken, Bernatovich, Lawson & Peterson (1999), Whitelock, Romano, Jelfs & Brna (2000), Nichols, Haldane & Wilson (2000)
	<p>+</p> <p>Psychologische Integration von Geräuschen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Integration von Geräuschen in das Präsenzepfinden verbesserte sich mit wiederholter Aussetzung in eine virtuelle Umgebung. 	Nunez & Blake (2005)
	<p>+</p> <p>Untersuchung des Einflusses von haptischer Rückmeldung auf das Präsenzepfinden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Haptische Rückmeldung verbesserte das Präsenzepfinden im Vergleich zu einer rein visuellen Rückmeldung. 	Sallnäss, Rasmus-Gröhn & Sjöström (2000)
	<p>+</p> <p>Untersuchung des Einflusses von haptischer Rückmeldung auf das Präsenzepfinden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche haptische Rückmeldung verbesserte das Präsenzepfinden im Vergleich zu einer zusätzlichen auditiven Rückmeldung. 	Durlach, Fowlkes & Metevier (2005), Luciani, Urma, Marliere & Chevrier (2003, 2004)
	<p>+</p> <p>Haptische Rückmeldung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine zusätzliche haptische Rückmeldung erhöhte das Präsenzepfinden. 	Reiner (2004)

Sensorische und sensomotorische Faktoren	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz	
+	Crossmodale Konsistenz und Koordination: ▪ Die crossmodale Konsistenz und Koordination von multisensorischen Informationen erwies sich als kritischer Faktor für das Präsenzepfinden.	Held & Durlach (1991), Biocca & Rolland (1998)	
	Olfaktorische Rückmeldung: ▪ Es wurde angenommen, dass eine zusätzliche olfaktorische Rückmeldung das Präsenzepfinden erhöht.	Barfield & Danas (1996)	
Gesichtsfeld	+	Gesichtsfeld: ▪ Das Gesichtsfeld („Field of view“) und das Präsenzepfinden hingen positiv zusammen.	Snow & Williges (1998), Hendrix & Barfield (1995, 1996a)
Perspektive	+	Egozentrische Bildschirmdarstellung vs. exozentrische HMD-Darstellung: ▪ Die egozentrische Darstellung hatte ein höheres Präsenzepfinden zur Folge als die exozentrische Darstellung.	Slater, Linakis, Usoh & Kooper (1996)
	⊖	Blickwinkel: ▪ Eine Variation des Blickwinkels zeigte keinen Einfluss auf das Präsenzepfinden.	Kim & Biocca (1997)
Stereopsis / Bewegungsparallaxe	+	Bereitstellung stereoskopischer Hinweisreize und von Bewegungsparallaxe: ▪ Die Bereitstellung von stereoskopischen Hinweisreizen und von Bewegungsparallaxe erhöhte das Präsenzepfinden.	Snow & Williges (1998), Barfield & Hendrix (1995a), Dillon, Keogh, Freeman & Davidoff (2001), Hendrix & Barfield (1995), Freeman, Avons, Pearson & Ijsselsteijn (1999), Hendrix & Barfield (1996a)
	+	Beurteilung der dreidimensionalen Darstellung: ▪ Eine schlechte Beurteilung der dreidimensionalen Darstellung führte zu einem erniedrigten Präsenzepfinden.	Nichols, Haldane & Wilson (2000)
Beleuchtung	+	Subjektiver Beleuchtungseindruck von der virtuellen Umgebung: ▪ Es konnte eine positive Korrelation zwischen dem subjektiven Beleuchtungseindruck und dem Präsenzepfinden gefunden werden.	Mania (2001)
	⊖	Variation der Beleuchtung der virtuellen Umgebung: ▪ Es konnte kein Zusammenhang zwischen Beleuchtung bzw. Beleuchtungseindruck und Präsenzepfinden gefunden werden.	Zimmons & Panter (2003), Kim & Biocca (1997)
Update-Rate	+	Update-Rate: ▪ Die Update-Rate, d.h. die Frequenz, mit der neue Bilder berechnet werden, und das Präsenzepfinden hingen positiv zusammen	Snow & Williges (1998), Barfield & Hendrix (1995b), Barfield, Baird & Bjorneseth (1998), Slater & Usoh (1993a)
Szenenkomplexität / Texturen / Objektdetails	+	Texturierung: ▪ Die Texturierung von Objekten erhöhte das Präsenzepfinden.	Snow & Williges (1998)
	+	Szenenkomplexität: ▪ Eine erhöhte Szenenkomplexität erhöhte das Präsenzepfinden.	Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy (2002)
	⊖	Rendering: ▪ Variationen im Rendering einer Szene hatten keinen Einfluss auf das Präsenzepfinden.	Zimmons & Panter (2003)

Sensorische und sensomotorische Faktoren	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
Realistische Darstellung / Wirklichkeitsnähe	+ Realistische bildhafte Szenendarstellung: ▪ Eine realistische bildhafte Darstellung der Szene erhöhte das Präsenzepfinden.	Welch, Blackmon, Mellers & Stark (1996), Hofmann, Jäger, Deffke & Bubb (2001)
	+ Realistische Darstellung der Hand des Benutzers: ▪ Eine realistische Darstellung der Hand des Benutzers in der virtuellen Umgebung erhöhte das Präsenzepfinden.	Durlach, Fowlkes & Metevier (2005)
	⊖ Zwei- vs. dreidimensionale Darstellung einer Szene: ▪ Es zeigte sich kein Effekt auf das Präsenzepfinden.	Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy (2002)
	+ Faktorenanalytische Untersuchung eines selbstkonstruierten Fragebogens: ▪ Die ökologische Validität der Darstellung, d.h. eine realistische Darstellung der virtuellen Umgebung, wurde als Faktor extrahiert.	Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff (2001), Schubert, Friedmann & Regenbrecht (2001)
Qualität der Ein-/Ausgabegeräte	+ Qualität der Ein-/Ausgabegeräte: ▪ Die Qualität der Ein-/Ausgabegeräte erwies sich als guter Prädiktor für das Präsenzepfinden.	Barfield & Weghorst (1993)
	+ Vergleich verschiedener Ausgabegeräte: ▪ Beim Vergleich zwischen realer, HMD-, Bildschirm- und Audiobedingung bei der Darstellung derselben Umgebung zeigte sich, dass das Präsenzepfinden bei der realen Darstellung am höchsten war. Die drei Bedingungen HMD, Bildschirm und Audio unterschieden sich jedoch nicht untereinander bzgl. des Präsenzepfindens.	Mania & Chalmers (2001)
	⊖ Zwei verschiedene Eingabegeräte (Joystick vs. SpaceBall): ▪ Es zeigte sich kein Einfluss auf das Präsenzepfinden.	Barfield, Baird & Bjorneseth (1998)
	+ Faktorenanalytische Untersuchung eines selbstkonstruierten Fragebogens: ▪ Das Bemerkte der Ein-/Ausgabegeräte lud negativ auf dem Präsenzepfinden.	Schubert, Friedmann & Regenbrecht (2001)
	+ Vergleich von CAVE mit einer interaktiven Schalttafel: ▪ Das Präsenzepfinden war beim CAVE höher.	Sutcliffe, Gault & Shin (2005)
	- Hohe Komplexität von Eingaben: ▪ Eine hohe Eingabekomplexität erniedrigte das Präsenzepfinden.	Marsh (2001)
	Sensorbewegungen	+ Verfolgen von Kopfbewegungen: ▪ Das Verfolgen von Kopfbewegungen („head tracking“) erhöhte das Präsenzepfinden.
Interaktion / Interaktivität	⊖ Anzahl der möglichen Interaktionen mit Objekten: ▪ Die Anzahl der möglichen Interaktionen hatte keinen Effekt auf das Präsenzepfinden.	Snow & Williges (1998)
	+ Interaktivität als Möglichkeit, die Umgebung zu modifizieren: ▪ Eine höhere Interaktivität erhöhte das Präsenzepfinden.	Welch, Blackmon, Mellers & Stark (1996)
	+ Interaktivität als Möglichkeit, die Umgebung zu modifizieren: ▪ Männer zeigten ein höheres Präsenzepfinden bei höherer Interaktivität als Frauen.	Nicovich, Boller & Cornwell (2005)

Sensorische und sensomotorische Faktoren	Zusammenhang zum Präsenzepfinden	Referenz
Wirklichkeitsnähe der Interaktion / Konsistente Regeln bei der Interaktion	+ Einfachheit der Interaktion: ▪ Die Einfachheit der Interaktion trug zum Präsenzepfinden bei.	Barfield & Weghorst (1993)
	+ Wirklichkeitsnähe der Interaktion: ▪ Die Wirklichkeitsnähe der Interaktion korrelierte hoch mit dem Präsenzepfinden.	Barfield & Hendrix (1995a), Hendrix & Barfield (1996a)
	+ Gelten der Naturgesetze: ▪ Die Verletzung von Naturgesetzen (z.B. Schwerkraft) in der vermittelten Umgebung verminderte das Präsenzepfinden.	Slater & Usoh (1993a)
	∅ Interaktion mit realen Objekten in der virtuellen Umgebung: ▪ Die Interaktion mit in die virtuelle Umgebung augmentierten realen Objekten zeigte keinen Einfluss auf das Präsenzepfinden.	Lok, Naik, Whitton & Brooks (2004)
Zeitverzögerung	- Latenz: ▪ Zeitverzögerung (visuell) beeinträchtigte das Präsenzepfinden.	Held & Durlach (1991), Welch, Blackmon, Mellers & Stark (1996), Slater & Usoh (1993a), Meehan, Razzaque, Whitton & Brooks (2003), Meehan, Razzaque, Insko, Whitton & Brooks (2005)
Systemresponsivität	+ Responsivität: ▪ Eine verbesserte Responsivität des Eingabegeräts und der Rückmeldung aus der vermittelten Umgebung erhöhte das Präsenzepfinden.	Barfield, Baird & Bjorneseth (1998), Stanney & Salvendy (1998)
Eigenschaften der Aufgabe	+ Aufgabenkomplexität (räumliche Aufgabe): ▪ Es wurde ein starker Interaktionseffekt zwischen Aufgabenkomplexität und Geschlecht gefunden: In der komplexeren Bedingung hatten Frauen ein niedrigeres Präsenzepfinden als in der einfacheren Bedingung, bei Männern war der Effekt eher umgekehrt.	Slater, Steed, McCarthy & Maringelli (1998)
	- Aufgabenschwierigkeit (haptisch-räumliche Aufgabe): ▪ Die Aufgabenschwierigkeit trug signifikant zum Präsenzepfinden bei. Je höher die Schwierigkeit war, desto geringer war das Präsenzepfinden.	Riley, Kaber & Draper (2004)
Störungen aus der aktuellen Umgebung	- Ereignisse in der aktuellen Umgebung: ▪ Ereignisse in der aktuellen Umgebung (z.B. Anwesenheit des Versuchsleiters) verminderte das Präsenzepfinden.	Slater & Usoh (1993a)
	- Erfassung der „Breaks in Presence“: ▪ Die „Breaks in Presence“, d.h. die Häufigkeit des Aufmerksamkeitswechsels von der virtuellen auf die aktuelle Umgebung, war negativ korreliert mit dem Präsenzepfinden. ▪ Dabei führte das Gefühl, allein zu sein, nicht beobachtet zu werden und die Ausblendung von Geräuschen aus dem Experimentallabor zu weniger „Breaks in Presence“. Das Bemerkten der Anwesenheit des Versuchsleiters war nicht mit den „Breaks in Presence“ assoziiert. ▪ Die Anzahl der „Breaks in Presence“ war positiv korreliert mit der Herzrate und der Hautleitfähigkeit.	Slater & Steed (2000), Brogni, Slater & Steed (2003), Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater (2005)
	- Hintergrundmusik im Labor während des Experiments: ▪ Das Bewusstsein über die Hintergrundmusik korrelierte negativ mit dem Präsenzepfinden.	Nichols, Haldane & Wilson (2000)

Sensorische und sensomotorische Faktoren	Zusammenhang zum Präsenzempfinden	Referenz
-	Faktorenanalytische Untersuchung eines selbstkonstruierten Fragebogens: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Aufmerksamkeit, die auf Stimuli aus der aktuellen Umgebung gerichtet sind, laden negativ auf dem Präsenzempfinden. 	Schubert, Friedmann & Regenbrecht (2001)

Bei den sensorischen und sensomotorischen Komponenten sind die Ergebnisse insgesamt konsistenter als bei den Persönlichkeitseigenschaften und –variablen.

Für die sensorische Tiefe, die sensorische Breite, das Gesichtsfeld, die Bereitstellung von stereoskopischen Hinweisreizen, die Update-Rate, die Sensorbewegung wie das Verfolgen von Kopfbewegungen sowie die Systemresponsivität konnten ausschließlich positive Zusammenhänge zum Präsenzempfinden verzeichnet werden. Diese Variablen stellen sensorische Rückmeldungen aus der vermittelten Umgebung dar, die den perzeptuellen Gesetzmäßigkeiten in der natürlichen Umwelt des Benutzers folgen. In dieser stehen ihm alle Modalitäten zur Verfügung, das Gesichtsfeld ist nicht eingeschränkt, es sind sämtliche stereoskopische Hinweisreize enthalten, die aktuelle Umgebung wird kontinuierlich und nicht als Einzelbildern zusammengesetzt wahrgenommen, mittels Kopfbewegungen kann der Benutzer einen anderen Ausschnitt einer Szene betrachten und auf seine Aktionen folgt unmittelbar eine Reaktion in Echtzeit.

Bei den Variablen, die inkonsistente Zusammenhänge zum Präsenzempfinden zeigten, bei denen also sowohl positive, eingeschränkt positive oder keine Beziehung zum Präsenzerleben gefunden wurden, handelt es sich nicht um perzeptuelle Gesetzmäßigkeiten. Die Perspektive, die Beleuchtung, die Szenenkomplexität, die Aufgabenkomplexität sowie die Interaktionsmöglichkeit sind auch in der natürlichen Umwelt des Benutzers veränderliche Variablen. Die inkonsistenten Ergebnisse für die Variablen Wirklichkeitsnähe der Darstellung und der Interaktion sprechen für die Lernfähigkeit von Benutzern, wonach neue Arten der Darstellung und der Interaktion auch im natürlichen Umgang mit der Alltagsumgebung ständig neu gelernt und angepasst werden müssen. Inwieweit die Darstellung und die Interaktion von den natürlichen Gegebenheiten abweichen dürfen, ohne das Präsenzempfinden zu beeinflussen, bleibt ungeklärt. Ebenso unklar ist, inwiefern dies von der jeweiligen Aufgabe und von den Anforderungen an den Benutzer abhängt. Hier ist viel mehr systematische Forschung notwendig, um die Erwartungshaltungen von Benutzern bezüglich der Darstellung sowie der Interaktion in einer vermittelten Umgebung und den Grad der erlaubten Abweichung von diesen Erwartungshaltungen zu analysieren.

Für beeinträchtigende Variablen wie die Zeitverzögerung, die Aufgabenschwierigkeit, eine zu hohe Komplexität von Ein-/Ausgabegeräten und Störungen aus der aktuellen Umgebung wurden ausschließlich negative Korrelationen mit dem Präsenzerleben gefunden. Wenn Benutzer daran gehindert werden, ihre Aufmerksamkeit voll auf die vermittelte Umgebung zu richten bzw. wenn ihre Fertigkeiten für die Aufgabenerfüllung überschritten werden, wirkt sich das auf das Präsenzempfinden negativ aus.

Insgesamt zeigt sich, dass bei Telepräsenz Anwendungen für ein hohes Präsenzepfinden die Einhaltung von perzeptuellen Gesetzmäßigkeiten der natürlichen Umwelt und die Vermeidung von beeinträchtigenden Variablen erforderlich sind. Perzeptuell veränderliche Variablen in der natürlichen Umgebung und neu erlernbare Verhaltensweisen zeigen hingegen keinen konsistenten Zusammenhang zum Präsenzepfinden, bei diesen Komponenten kann von der Wirklichkeitsnähe abgewichen werden. Das Ausmaß der erlaubten Abweichung und deren Abhängigkeit von der Aufgabe und den Anforderungen blieben bisher jedoch ungeklärt.

2.5. Empirisch ermittelte Zusammenhänge zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung

Bei den empirisch ermittelten Zusammenhängen zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung zeigt sich ein ähnlich inkonsistentes Bild wie bei den in den beiden vorangegangenen Abschnitten behandelten Komponenten. Bis heute ist unklar, ob die Beziehung zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung kausal oder korrelativ ist, weiterhin ist nicht bekannt, durch welche Prozesse das Präsenzepfinden zu einer veränderten Aufgabenleistung führt (Welch, 1999).

Einige Autoren berichten von einer uneingeschränkten positive Beziehungen zwischen Aufgabenleistung und Präsenzepfinden. Held & Durlach (1991) fanden bei einer Bahntrackingaufgabe, bei der Zeitverzögerung als Bedingung eingeführt wurde, ein erniedrigtes Telepräsenzepfinden bei abnehmender Kompensationsleistung. Sallnäss, Rasmus-Gröhn & Sjöström (2000) erfassten sowohl die absolute als auch die wahrgenommene Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, bei der virtuell mit Bauklötzen ein vorgegebenes Modell nachgebaut werden sollte, wobei die haptische Rückmeldung als Bedingung eingeführt wurde. Sie fanden, dass die haptische Rückmeldung sowohl das Präsenzepfinden, die absolute Zeit als auch die wahrgenommene Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe erhöhte und schlossen auf einen positiven Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Hecht, Reiner & Halevy (2005) fanden bei multimodaler Rückmeldung eine schnellere Reaktionszeit und ein erhöhtes Präsenzepfinden gegenüber uni- oder bimodaler Rückmeldung und nahmen daher ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung an. Analog konnten Kim & Biocca (1997) eine positive Beziehung ausmachen, bei einer Verkaufssendung hatte das Präsenzepfinden einen positiven Effekt sowohl auf die Erinnerungsleistung als auch auf die Wiedererkennungsgeschwindigkeit.

Andere Literaturstellen berichten von einem eingeschränkten Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy (2002) ließen ihre Probanden Aufgaben in einer virtuellen Umgebung durchführen, die Fortbewegung, Objektmanipulation, Bahntracking, Reaktionszeit und Wiedererkennung beinhalteten. Als unabhängige Variablen führten sie die Szenekomplexität, die Benutzerkontrolle von Bewegungen sowie die Kontaktdauer mit der virtuellen Umgebung ein. Dabei zeigte die Szenekomplexität einen positiven Einfluss auf das Präsenzepfinden, auf die Aufgabenleistung jedoch entweder keinen oder einen negativen Effekt. Bei der

Benutzerkontrolle von Bewegungen waren Präsenzepfinden und Aufgabenleistung nur bei Aufgaben, bei denen Fortbewegungs- und Reaktionszeitmaße erhoben wurden, positiv korreliert. Bei Manipulationsaufgaben zeigte sich hingegen ein negativer Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Die Kontaktdauer hatte keinen Effekt auf das Präsenzepfinden, war jedoch positiv korreliert mit der Aufgabenleistung. Slater, Linakis, Usoh & Kooper (1996) fanden bei einer virtuellen Aufgabe mit einem dreidimensionalen Schachspiel einen positiven Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung bei der perspektivischen Darstellung, jedoch keinen Zusammenhang bei dem Vergleich einer schlichten mit einer realistischen Darstellung.

Wiederum andere Autoren fanden keinen Zusammenhang bzw. keine Kovarianz zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Bei einer Suchaufgabe in realer und virtueller Umgebung konnten Usoh, Catena, Arman & Slater (2000) keine Korrelation verzeichnen. Auch Zimmons & Panter (2003) fanden keinen Zusammenhang zwischen der Fehlerrate bei einem virtuellen Ballwurf und dem Präsenzepfinden. Bei Manipulationsaufgaben in virtueller Umgebung berichten Durlach, Fowlkes & Metevier (2005), Lok, Naik, Whitton & Brooks (2003) sowie Sutcliffe, Gault & Shin (2005) ebenfalls einen fehlenden Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Mania & Chalmers (2001) konnten ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen der Erinnerungsleistung und dem Präsenzerleben finden. Whitelock, Romano, Jelfs & Brna (2000) ermittelten, dass eine zusätzliche auditive Rückmeldung zwar das Präsenzepfinden erhöhte, jedoch keinen Einfluss auf die Aufgabenleistung hatte.

Sas, O'Hare & Reilly (2004) fanden sogar einen negativen Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung. Bei einer Such- und Navigationsaufgabe in einer virtuellen Umgebung gingen kürzere Zeiten bis zur Beendigung der Aufgabe und eine geringere Anzahl an Kollisionen mit Objekten in der virtuellen Umgebung mit einem erniedrigten Präsenzepfinden einher, die Korrelation zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung ist hier negativ.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass auch beim Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung sehr inkonsistente Ergebnisse vorliegen. Die Varianz in der Aufgabenleistung kann zum größten Teil durch andere Faktoren erklärt werden. Auch die Aufgabenart präsentierte sich nicht als aufklärender Faktor. Dies lässt darauf schließen, dass die beiden Konstrukte Präsenzepfinden und Aufgabenleistung unabhängig voneinander sind und durch andere Variablen bzw. Prozesse, die anforderungs- und aufgabenabhängig sind, vermittelt werden. An den beiden Konstrukten sind auch unterschiedliche Verteilungen von Aufmerksamkeitsressourcen beteiligt. Während das Präsenzepfinden den Anteil der Ressourcen, der auf die vermittelte Umgebung gerichtet ist, an den Gesamtressourcen kennzeichnet, ist die Aufgabenleistung unter Anderem bestimmt durch die Gesamtheit aller Ressourcen, die auf die Aufgabe gelenkt sind (Draper, Kaber & Usher, 1998; Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000).

Nach Bystrom, Barfield & Hendrix (1999) wird die Aufgabenleistung determiniert durch Aufmerksamkeitsressourcen, Aufgabenerfordernisse und einem minimalen Beitrag an Präsenzepfinden. Bisher wurde dieser postulierte Zusammenhang ebenso wie der postulierte

Einfluss der Aufmerksamkeitsressourcen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden jedoch nicht systematisch untersucht.

2.6. Zusammenfassung und Bedeutung für virtuelle und Telepräsenzsysteme

Das (Tele-) Präsenzepfinden wurde in der Literatur auf unterschiedliche Weise definiert. Die einzelnen Definitionen unterscheiden sich dabei in manchen Fällen nur um Nuancen, in anderen Auslegungen bestehen größere Differenzen zwischen den Definitionen. Zudem wurde das Konzept kontinuierlich erweitert. Der Grundtenor für die Definition des Präsenzepfindens besteht darin, dass sich der Benutzer in eine vermittelte Umgebung hineinversetzt fühlt; dies wird häufig mit der Kurzformel „sense of being there“ beschrieben. Als dem Präsenzepfinden zugrunde liegender Prozess wird in dieser Arbeit die Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen betrachtet. Das Präsenzepfinden kommt demnach zustande durch ein hohes Ausmaß an Zuteilung der Aufmerksamkeitsressourcen in die vermittelte Umgebung bzw. eine möglichst geringe Distraktorwirkung der Vermittlung gemessen an den zur Verfügung stehenden Gesamtressourcen. Daher sollte bei Telepräsenz Anwendungen der Aufmerksamkeitsfokus des Benutzers möglichst auf die vermittelte Umgebung gerichtet werden, d.h. die Telepräsenz Anwendung sollte nicht langweilig sein, eine Relevanz für den Benutzer haben und die Ein-/Ausgabegeräte sowie die Displays, mit denen die Informationen mit der vermittelten Umgebung ausgetauscht werden, sollten möglichst unaufdringlich und nicht zu komplex zu bedienen sein.

Als Maße für das Präsenzepfinden kommen sowohl subjektive als auch objektive Maße in Betracht. Bei den subjektiven Maßen besteht vor allem das Problem der erniedrigten Reliabilität, wohingegen bei objektiven Maßen zumeist die Validität in Frage gestellt wird. Da das Präsenzepfinden einen subjektiven Zustand darstellt, erscheint es sinnvoll, dieses auch mit subjektiven Maßen, insbesondere mit Fragebögen, zu erfassen. In der vorliegenden Arbeit werden dafür hauptsächlich Teile des einzigen deutschsprachigen validierten Fragebogens zur Präsenz und immersiven Tendenz in virtuellen Umgebungen von Scheuchenpflug (2001) eingesetzt.

Aufmerksamkeitsprozesse werden beeinflusst durch kognitive, motivationale, affektive, motorische und perzeptuelle Eigenschaften und Zustände des Benutzers. Da für das Präsenzepfinden sowie für dessen Komponenten ein theoretischer Bezugsrahmen fehlt, stehen diese Konzepte bislang unverbunden nebeneinander.

Die Ergebnisse empirischer Untersuchungen konnten aufzeigen, dass vor allem affektive, motivationale und perzeptuelle Komponenten zum Präsenzepfinden beitragen. Bei Telepräsenz Anwendungen sollte der Benutzer daher affektiv und motivational eingebunden werden. Dies kann beispielsweise durch gesetzte Anreize (z.B. Belohnungen) oder auch durch die Erzeugung von persönlicher Relevanz für den Benutzer (z.B. Verwendung einer virtuellen Umgebung zur Expositionstherapie bei Ängsten) erreicht werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, von vorne herein Benutzer auszuwählen, die eine hohe Ausprägung bei affektiven und motivationalen Konstrukten aufweisen.

Weiterhin sollten Naturgesetze und Gesetzmäßigkeiten bei der Wahrnehmung auch in einer vermittelten Umgebung gewahrt bleiben, da hier die empirischen Befunde für einen

positiven Zusammenhang zum Präsenzepfinden sprechen. Beispielsweise sollten multisensorische Rückmeldung gegeben, Gesetze der Schwerkraft befolgt, eine ausreichend hohe Auflösung der Informationen aus der vermittelten Umgebung rückgemeldet oder Zeitverzögerungen möglichst gering gehalten werden.

Dahingegen tragen kognitive, motorische und interaktive Komponenten nicht zwingend zum Präsenzepfinden bei. Bei in der natürlichen Umwelt veränderlichen Variablen kann ein neues Verhalten von Benutzern erlernt werden, ohne das Präsenzepfinden zu beeinträchtigen. Dem Benutzer sollte die Möglichkeit gegeben werden, bereits erlernte kognitive, motorische und sensomotorische Strategien in die vermittelte Umgebung zu transferieren. Wodurch dies bei Telepräsenzsystemen gewährleistet werden kann, ist allerdings bislang unklar.

Der Zusammenhang zwischen Präsenzepfinden und Aufgabenleistung ist ebenfalls nicht geklärt. Die Resultate aus der Literatur lassen den Schluss zu, dass diese beiden Konzepte unabhängig voneinander sind und durch unterschiedliche Aufmerksamkeitsprozesse vermittelt werden. Während das Präsenzepfinden das Verhältnis von zur vermittelten Umgebung zugeteilten Aufmerksamkeitsressourcen zu den Gesamtressourcen darstellt, wird die Aufgabenleistung beeinflusst durch die Aufmerksamkeitsressourcen, die auf die Aufgabe gelenkt sind bzw. gelenkt werden müssen. Welche Drittvariablen als Moderatoren für den Zusammenhang wirken, ist ebenfalls nicht bestimmt. Bei Telepräsenzsystemen spielt somit der Schwerpunkt der Anwendung eine entscheidende Rolle. Ist das System darauf ausgelegt, ein möglichst starkes Präsenzepfinden hervorzurufen wie dies beispielsweise bei virtuellen Therapieformen oder im Bereich des Entertain- und Edutainment der Fall ist, sollten die bereits oben angesprochenen affektiven, motivationalen und perzeptuellen Komponenten bei dem System eingebracht werden. Steht hingegen die Aufgabenleistung im Vordergrund, sollte die Aufgabe so beschaffen sein, dass möglichst viele Aufmerksamkeitsressourcen vom Benutzer auf die Aufgabe gelenkt werden. Dafür sollte die Aufgabe ansprechend und nicht zu komplex gestaltet werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Präsenzepfinden ein multidimensionales Konstrukt ist, dessen vielfältige Wirkungsweisen und Komponenten sowie der Bezug zur Aufgabenleistung bislang nur unzureichend erforscht ist.

3. Akquisitions- und Übertragungsparameter im Kommunikationskanal²

Wie bereits in Kapitel 1 dieser Arbeit erörtert wurde, stellt die Kommunikation von Daten zwischen Benutzer und ausführender Einheit ein besonderes Merkmal von Telepräsenzsystemen dar. In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Konzepte und Bestandteile von Kommunikationsparametern erläutert, bevor im folgenden vierten Kapitel die Auswirkungen ausgewählter Kommunikationsparameter auf die Wahrnehmung, das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung untersucht werden.

Für „Kommunikation“ gibt es viele Erklärungen und Definitionen, eines ist jedoch allen gemeinsam: Bei Kommunikation wird Information transportiert (Steinbuch, 1977). Informationen im Zustand der Übertragung sind Nachrichten, Signale werden als physikalische Darstellungen von Nachrichten definiert (Gerdsen & Kröger, 1993; DIN 44300/2). Da Telepräsenzsysteme Anwendungen im Computerbereich sind und Informationen zwischen Mensch und Maschine übertragen werden, ist es üblich, dass die Signalverarbeitung digital erfolgt (Steinbuch, 1977). Dies ist auch bei der Datenübertragung zweckmäßig, da digitale Daten weniger Bandbreite benötigen als analoge Daten (Gommlich & Schuon, 1995; Gerdsen & Kröger, 1993).

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt bei der Übertragung von haptischen und visuellen Signalen. Haptische Signale sind entweder sinusförmig (v.a. Vibrationen), trapez- oder dreiecksförmig (Burdea, 1996). Bei visuellen Signalen handelt es sich um elektromagnetische Schwingungen (Glaser, 1997). Da es sich also in beiden Fällen um zeit- und wertkontinuierliche, also „analoge“ Signale handelt, müssen diese digitalisiert werden, um sie computergestützt verarbeiten und übertragen zu können. Die Umwandlung von zeitkontinuierlichen in zeitdiskrete Daten erfolgt mittels Abtastung, die von wertkontinuierlichen in wertdiskrete Signale mittels (Amplituden-) Quantisierung. Im folgenden Abschnitt werden diese beiden Konzepte näher erläutert.

3.1. Abtastung und Quantisierung

Bei der Datenübertragung über einen Kommunikationskanal werden analoge Signale durch Abtastung und Quantisierung in digitale umgewandelt. Diese beiden Prozesse können mit dem Term Akquisitionsparameter zusammengefasst werden.

Die Abtastfrequenz gibt dabei die Anzahl von Abtastungen des analogen Signals pro Zeiteinheit an (meist wird als Zeiteinheit Sekunde gewählt, die Abtastfrequenz wird dann in $\text{Hz} = 1/\text{s}$ angegeben). Dabei wird der Wert des Signals zu festgelegten Zeitpunkten angeführt, der Abtastwert ist also der Wert des analogen Signals zum Abtastzeitpunkt. Durch eine äquidistante Abtastung müssen die Abtastzeitpunkte nicht zusätzlich protokolliert werden.

Die Abtastung wird am Beispiel einer sinusförmigen Schwingung mit einer Schwingungsfrequenz von 50 Hz und einer Abtastfrequenz von 1000 Hz in Abbildung 3.01 veranschaulicht.

² In diesem Kapitel werden lediglich die für diese Arbeit wichtigsten Konzepte in vereinfachter Form dargestellt. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Aus der Folge von diskreten Werten kann das analoge Ausgangssignal dann rekonstruiert werden, wenn die Abtastfrequenz mindestens das Doppelte der oberen Grenzfrequenz des ursprünglichen Analogsignals beträgt (Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, Shannon & Weaver, 1976). Bei der praktischen Anwendung hat sich eine etwas höhere Abtastfrequenz (Faktor von ca. 2.2 bis 2.5) durchgesetzt. Jedoch konnte gezeigt werden, dass die Nyquist-Shannon-Rate nicht unter jeder Bedingung ausreichend ist (z.B. bei unregelmäßigen bzw. nicht prädizierbaren Signalen; Shannon, 1998).

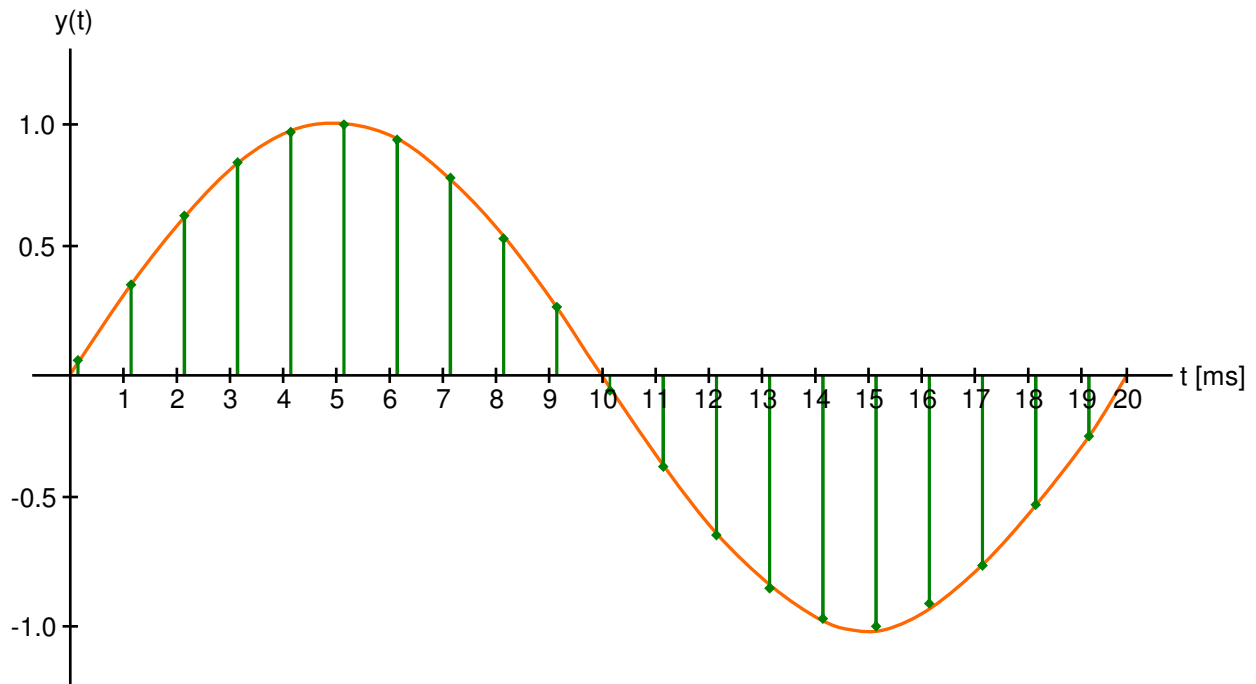
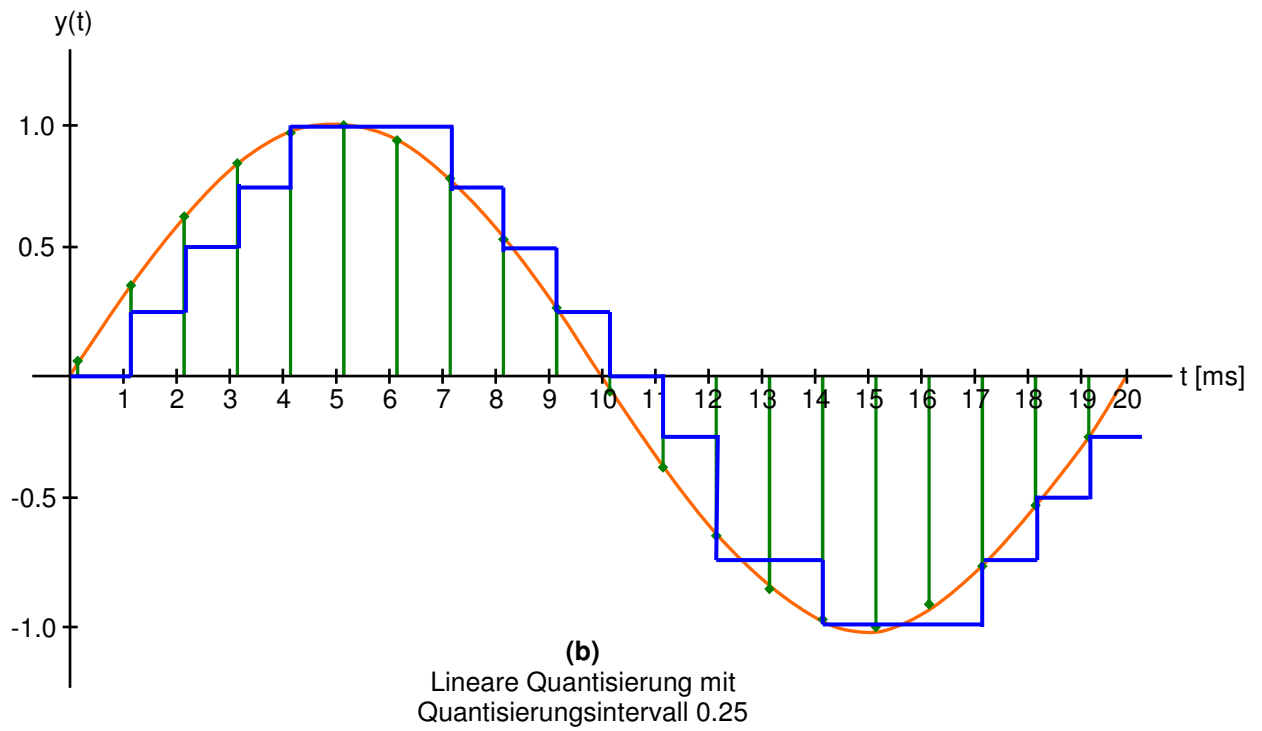
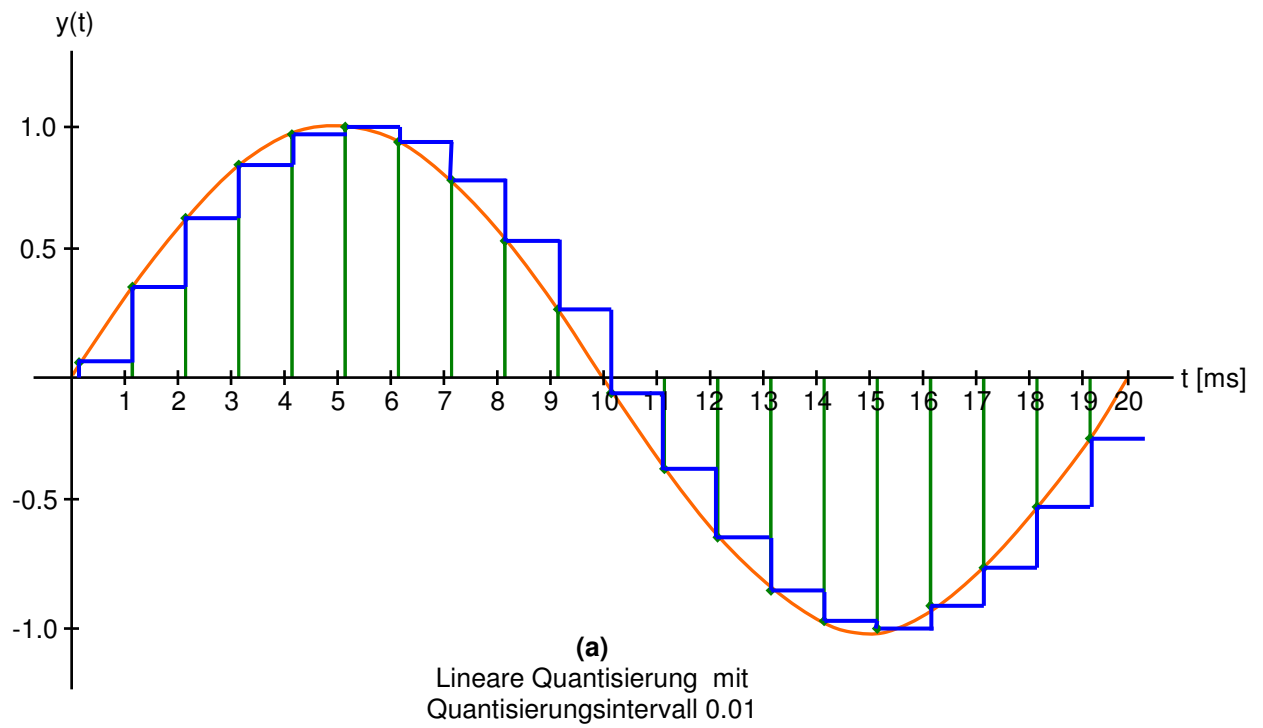


ABBILDUNG 3.01. Abtastung einer sinusförmigen Schwingung (Schwingungsfrequenz 50 Hz) mit einer Abtastrate von 1000 Hz. Die Abtastwerte sind als Rauten dargestellt.

Bei der Quantisierung wird der Wertebereich der Signale in Intervalle zerlegt, denen die analogen Werte zugeordnet werden; vereinfacht ausgedrückt ist dies gleichbedeutend mit einer diskreten Einteilung der Werte auf der y-Achse. Die Quantisierungsintervalle können dabei jeweils dieselben Abstände aufweisen (lineare Quantisierung), es ist jedoch auch möglich, bestimmte Bereiche der y-Achse durch eine nicht-lineare Quantisierung genauer oder gröber darzustellen. Man spricht dabei von Quantisierungsart. Die gebräuchlichste nicht-lineare Quantisierungsart stellt die logarithmische Quantisierung dar, bei der kleine Bereiche feiner dargestellt werden als große Bereiche (Gommlich & Schuon, 1995). Abbildung 3.02 (a)-(c) verdeutlicht das Konzept der Quantisierung und verschiedene Quantisierungsarten für das in Abbildung 3.01 eingeführte Beispiel.



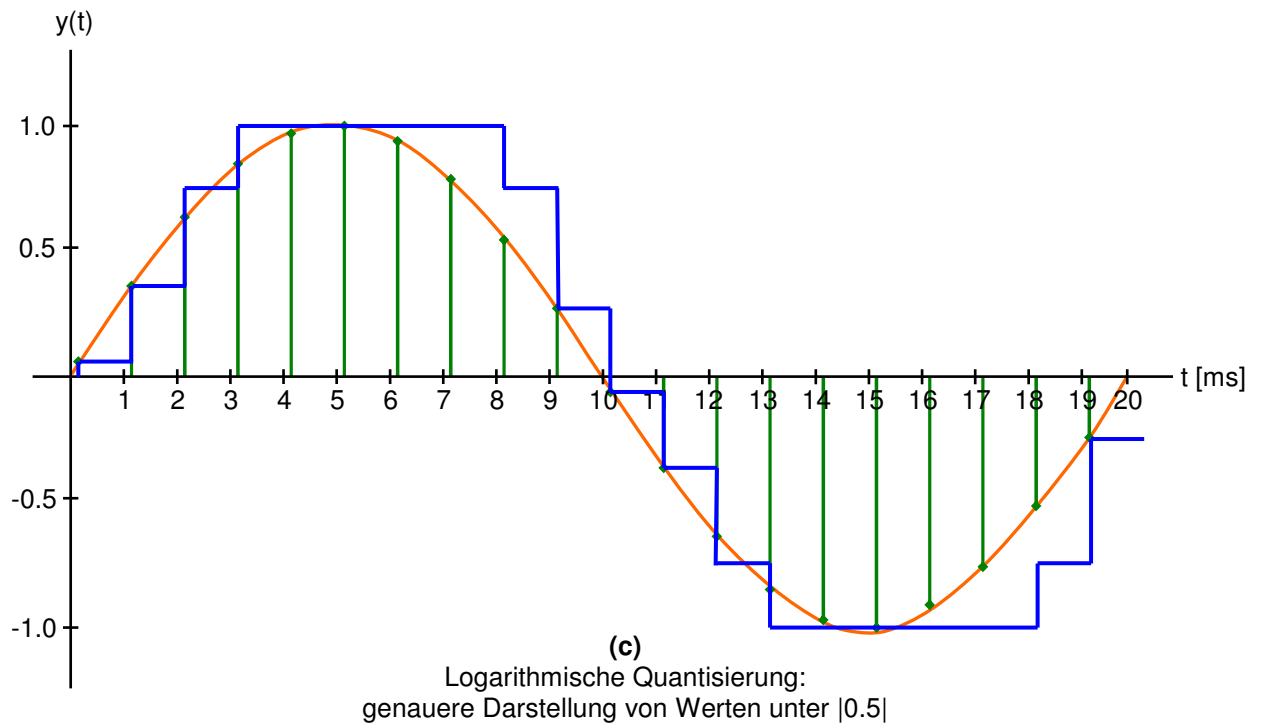


ABBILDUNG 3.02. Beispiele für verschiedene Quantisierungsintervalle und –arten. (a, b, c).

3.2. Datenkompression

Die Anwendung von Verfahren zur Reduktion des Speicherbedarfs von Daten wird als Datenkompression bezeichnet. Von verlustfreier Kompression spricht man, wenn die Originaldaten aus den komprimierten Daten ohne Verlust wieder rekonstruiert werden können, bei verlustbehafteter Kompression können die Originaldaten nicht in jedem Fall ohne Fehler dekomprimiert werden (Lelewer & Hirschberg, 1987).

In Telepräsenzsystemen ist eine Datenkompression aller sensorischer Daten unabdinglich, da der Kommunikationskanal meist eine beschränkte Kapazität aufweist (Lindner, 2005, S. 330; Conrads, 2001, S. 41 f) und teilweise lange Strecken (Weltraum, Unterwasserumgebung etc.) überwunden werden müssen (Oboe, 2003; Sheridan, 1993; MacKenzie & Ware, 1993).

Im Folgenden wird nur auf die gängigen Arten der Datenkompression eingegangen, die auch in Telepräsenzsystemen zum Einsatz kommen. Tabelle 3.01 zeigt die für Telepräsenzsysteme üblichen Eigenschaften und Beispiele für gebräuchliche Kompressionsverfahren für visuelle, auditive und haptische Daten im Überblick.

Heutige Kompressionsverfahren für sensorische Daten nutzen häufig menschliche Wahrnehmungseigenschaften, v.a. Wahrnehmungslücken und –grenzen aus, so dass eine verlustbehaftete Kompression zum Einsatz kommen kann, in der die Daten, die außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsbereichs liegen, bei der Kodierung wegfallen bzw. Unterschiede, die zu klein sind, um vom Menschen wahrgenommen werden zu können, nicht dargestellt werden.

TABELLE 3.01: Gängige Eigenschaften von visuellen, auditiven und haptischen Signalen bei Telepräsenz Anwendungen und Kompressionsverfahren (schon bestehende Standards sind mit * gekennzeichnet).

	Eigenschaften	Gängige Kompressionsverfahren
Videodaten	Auflösung: 640x480 Farbtiefe: 16 bit Bildwechselfrequenz: 30 Hz (fps) Hohe Rohdatenrate (147 Mbit/s)	MPEG-4*
Audiodaten	Abtastrate: 48 kHz Auflösung: 16 bit 2 Kanäle Datenrate: 1,5 Mbit/s	Geräusche: MPEG-2 layer 3 (MP3)* MPEG-4 (AAC)* Sprache: PCM (Puls-Code-Modulation; G.711)*
Haptische Daten	Freiheitsgrade: 1 bis >20 Abtastrate: bis 1000 Hz Auflösung: bis zu 16 bit Hohe Paketrate (bis zu 1000 Pakete/s)	Statistische Kompressionsverfahren Psychologisch motivierte Kompressionsverfahren

Als Beispiel sei hier das Puls-Code-Modulation (PCM) – Verfahren für die Digitalisierung auditiver Sprachsignale (v.a. genutzt beim Telefonieren über einen analogen Anschluss) genannt (Conrads, 2001; Rockrohr, 1983). Aus der menschlichen Hörkurve ergibt sich, dass die menschliche Hörschwelle für Sprachsignale am niedrigsten und somit die Empfindlichkeit am höchsten bei Frequenzen bis 4 kHz ist, was genau den Frequenzen entspricht, die beim Sprechen produziert werden, s. Abbildung 3.03. Beim PCM-Verfahren wird als Abtastrate 8 kHz festgelegt, wobei sich nach dem Abtasttheorem als obere Grenzfrequenz des zu übertragenden Sprachsignals 4 kHz ergibt. Weiterhin reagiert das menschliche Gehör im Bereich kleiner Amplituden feiner als bei großen Amplituden (logarithmische Empfindlichkeit). Daher werden auditive Sprachsignale in Deutschland und in den meisten Staaten der Welt nach dem sog. A-Gesetz (a-law) quantisiert, bei dem kleine Amplituden genauer dargestellt werden als große Amplituden (logarithmische Quantisierung). Somit werden durch das PCM-Verfahren die Eigenschaften der menschlichen auditiven Sprachwahrnehmung nachgebildet.

Während für visuelle und auditive Signale bereits Standards festgelegt wurden, fehlen diese für die Digitalisierung und Kompression haptischer Daten noch vollständig. Hierzu sind nur wenige Studien in der Literatur zu finden. Die Übertragung von haptischen Daten über einen Kommunikationskanal stellt eine besondere Herausforderung dar, da die Regelkreise in einem Telepräsenzsystem auf möglichst geringe Latenzzeiten während der Übertragung angewiesen sind und eine Verzögerung der haptischen Daten extrem kritisch für die Stabilität ist (Hirche, Buss, Hinterseer & Steinbach, 2005a). Zusätzlich führt das schlechte Nutzdaten/Header-Verhältnis der einzelnen Pakete zu einer sehr hohen Datenrate (bis zu 1000 Pakete/s). Ein Ansatz für die Datenkompression ist, dass die Abtastrate verändert wird (Shahabi, Ortega & Kolahdouzan, 2002), jedoch ist dies bei Telepräsenzsystemen nicht effektiv, da sich für den haptischen Bereich Abtastfrequenzen von mindestens 700 – 1000 Hz durchgesetzt haben, um einen realistischen haptischen Wahrnehmungseindruck zu gewährleisten und den Stabilitätsanforderungen solcher Systeme gerecht zu werden (Lecuyer, Burkhard, Le Biller & Congedo, 2005; Kim, De & Srinivasan, 2002; Wagner, Stylopoulos & Howe 2002; Peer, 2005).

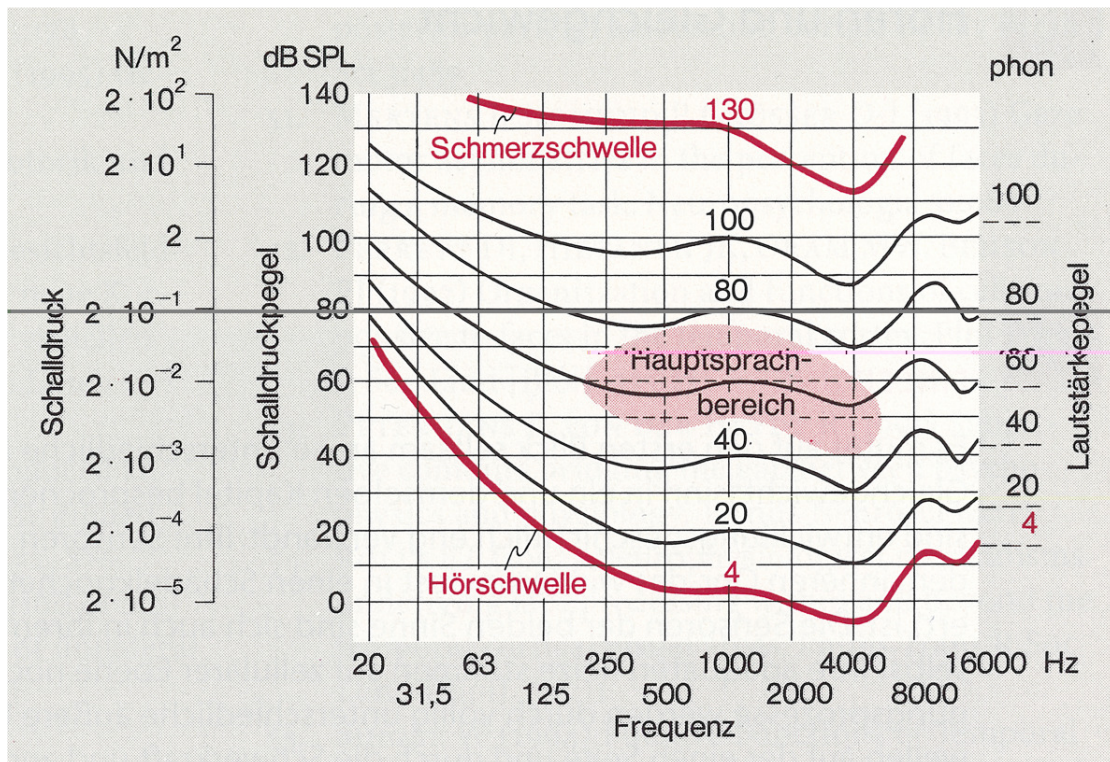


ABBILDUNG 3.03. Hörschwelle mit eingezeichnetem Hauptsprachbereich (Graphik aus Birbaumer & Schmidt, 1996, S. 412).

Im Sonderforschungsbereich 453 wurden bisher zwei Ansätze zur Kompression haptischer Daten verfolgt. Zum einen kam ein Kompressionsverfahren zum Einsatz, das die statistischen Eigenschaften von haptischen (v.a. Kraft-) Daten ausnutzt (Huffmann-Codierung) und zum anderen ein Verfahren, das menschliche Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen ausnutzt (psychologisch motiviertes Kompressionsverfahren; Hinterseer, Steinbach, Hirche & Buss, 2005; Hirche, Buss, Hinterseer & Steinbach, 2005b). Bei der statistischen Kompression haptischer Daten kann zwar die Paketgröße verringert werden, jedoch nicht die Paketrage, die sich als kritischer Faktor bei der Datenübertragung erwiesen hat (Kron, Schmidt, Petzold, Zäh, Hinterseer & Steinbach, 2004; Hirche, Buss, Hinterseer & Steinbach, 2005a). Das psychologisch motivierte Kompressionsverfahren hat sich inzwischen im Bereich des Sonderforschungsbereichs 453 bewährt und durchgesetzt. Hierbei wird eine Änderung eines haptischen Wertes erst übertragen, wenn die Änderung den betreffenden ebenmerklichen Unterschied übersteigt, so lange dies nicht der Fall ist, wird üblicherweise der vorherige Wert wiederholt dargeboten („hold last sample“, z.B. Hinterseer & Steinbach, 2006). Während in der Literatur zu reinen Normalkraftdaten bereits Befunde existieren, müssen viele Schwellen für den Anwendungsfall mit Hilfe psychophysischer Untersuchungen erhoben werden, so dass ein haptisches Wahrnehmungsmodell für verschiedene haptische Submodalitäten (z.B. Wahrnehmung von Kraft, Richtung, Nachgiebigkeit etc.) erstellt werden kann. Mit den betreffenden Arbeiten zu diesem psychologisch motivierten Ansatz und zur Kompression haptischer Daten beschäftigt sich Kapitel 4.3. dieser Arbeit.

3.3. Probleme bei der Datenübertragung

Für die Probleme bei der Datenübertragung sind hauptsächlich zwei Faktoren verantwortlich: der Digitalisierungsvorgang und die Kanaleigenschaften (Oboe, 2003).

Bei der Digitalisierung analoger Signale müssen analog-digital-Wandler bzw. digital-analog-Wandler eingesetzt werden. Diese haben v.a. Einfluss auf die Messgenauigkeit. Manchmal findet auch eine doppelte Wandlung von analog zu digital bzw. umgekehrt statt, dadurch werden Quantisierungsfehler kumuliert. Ebenfalls können die Implementierung der Verarbeitungsschritte und deren Abarbeitung sehr zeitaufwendig sein, dies macht teilweise Näherungsverfahren erforderlich, die ebenfalls wieder Ungenauigkeiten bei der Rekonstruktion des Originalsignals nach sich ziehen können (Oboe, 2003; Gommlich & Schuon, 1995, S. 250 ff.).

Zusätzlich treten Probleme bei Telekommunikationskanälen auf. Zu nennen sind hier vor allem die möglichen Zeitverzögerungen zwischen Sender und Empfänger und wieder zurück (Round Trip), die durch die Länge der Kommunikationsstrecke, durch die physikalische Beschaffenheit des Kommunikationskanals (Kabel, Radiowellen etc.) und evtl. durch zeitaufwendige Verarbeitungsschritte zustande kommen. Abgesehen davon, dass Latenzen sehr kritisch bzgl. der Stabilität von Systemen sind, stellen diese auch eine für den Menschen ungewohnte Eigenschaft dar, die zu hohen Leistungseinbußen bis hin zur Unfähigkeit, die Aufgabe zu bewältigen, führen können (Sheridan, 1993).

Insbesondere bei Internetverbindungen ist die verfügbare Durchlaufleistung häufig unbekannt (z.B. die verfügbare Bandbreite). Zudem treten variable Zeitverzögerungen, Verlust von Datenpaketen und Phasenjitter (Impulszittern) auf. Letzteres sind Ungenauigkeiten, die durch zeitliche (unbeabsichtigte) Variationen der Taktfrequenz bei der Abtastung zustande kommen können. Der Paketverlust wird ausgedrückt als der Prozentsatz der Pakete, die während der Übermittlung während eines Round Trips verloren gehen. Die Übertragungsleistung des Kommunikationsnetzes wird durch verschiedene Parameter beeinflusst, z.B. Netzbelastung, Distanz und Anzahl der zu durchlaufenden Knoten bzw. Router (Oboe, 2003).

Im Kapitel 4.4. werden als Schwerpunkte die Effekte von Zeitverzögerung im Kommunikationskanal auf die menschliche Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben untersucht.

3.4. Exkurs: Grundlagen der Psychophysik

Da die Einstellung von Kommunikationsparametern die Untersuchung menschlicher Wahrnehmungsschwellen notwendig macht, soll hier kurz auf die Messung von Reiz- und Unterschiedsschwellen (Empfindlichkeit), die mittels Methoden der Psychophysik erfolgt, eingegangen werden. Mittels psychophysikalischen Untersuchungen können sowohl menschliche Absolut- als auch Unterschiedsschwellen bestimmt werden, indem eine Beziehung zwischen physikalischem Reiz und subjektiver Empfindung hergestellt wird. Hierfür wurden drei klassische Methoden entwickelt (Bamber, 1969; Fechner, 1907; Woodworth & Schlosberg, 1954, Kap. 8 und 9; die Bezeichnungen in Anführungszeichen entsprechen der Originalbenennung von Fechner):

1. Grenzverfahren („Methode der ebenmerklichen Unterschiede“)

Zur Bestimmung der Absolutschwelle werden der Versuchsperson Reize in absteigender bzw. aufsteigender Reihenfolge vorgegeben, bis sie diese nicht mehr wahrnimmt (bei absteigender Reihenfolge) bzw. wahrnimmt (bei aufsteigender Reihenfolge).

Für die Bestimmung der Unterschiedsschwelle wird ein Paar aus Standard- und Referenzreiz vorgegeben, wobei die Differenz zwischen diesen beiden Stimuli sukzessive so lange verringert wird, bis die Versuchsperson keinen Unterschied mehr wahrnimmt bzw. so lange vergrößert wird, bis ein Unterschied erkannt wird.

2. Konstanzverfahren („Methode der richtigen und falschen Fälle“)

Die Absolutschwelle wird ermittelt, indem um den vermuteten Schwellenwert herum Reize in zufälliger Reihenfolge dargeboten werden, die Versuchsperson soll wiederum angeben, ob sie den Reiz wahrnimmt oder nicht.

Bezüglich der Schwelle für den ebenmerklichen Unterschied werden Standard- und Referenzreize mit zufällig verteilter Differenz dargeboten, die Versuchsperson soll auch hier angeben, ob sie einen Unterschied wahrnimmt oder nicht. Dieses Verfahren ist das aufwendigste, liefert jedoch auch die genauesten Werte.

3. Herstellungsverfahren („Methode der mittleren Fehler“)

Bei diesem Verfahren variiert die Versuchsperson selber die Reize so lange, bis sie gerade noch etwas wahrnimmt (Absolutschwelle) bzw. sie stellt die Differenz zwischen Standard- und Referenzreiz so ein, dass sie diese beiden gerade noch als gleich empfindet. Diese Methode stellt die am wenigsten aufwendige, jedoch ungenaueste dar.

Neben diesen klassischen Ansätzen wurde mittlerweile eine Vielzahl von adaptiven Verfahren entwickelt, bei denen hauptsächlich die benötigte Anzahl der dargebotenen Reize bzw. Reizpaare verringert wird, ohne die Genauigkeit zu beeinträchtigen (z.B. Kaernbach, 2001; Leek, 2001; Levitt, 1971; Luce & Krumhansl, 1988; Treutwein, 1995).

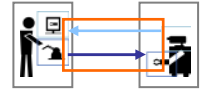
Schon der Physiologe E.H. Weber (1846) entdeckte, dass bezüglich der Unterschiedsschwelle eine Abhängigkeit von der Größe des Standardreizes vorliegt, genauer, dass beim ebenmerklichen Unterschied ein konstantes Verhältnis zum Standardreizbetrag besteht:

$$\frac{\Delta S}{S} = k,$$

wobei ΔS den ebenmerklichen Reizunterschied, S den Standardreiz und k eine Konstante darstellt. Diese Formel ist als Webersches Gesetz bzw. als Weber-Bruch bekannt (Gescheider, 1985). Dessen Gültigkeit wurde mittlerweile für fast alle Sinnesmodalitäten und für breite Stimulusbereiche nachgewiesen, sofern die Reizstärke nicht zu nahe an der Absolutschwelle

liegt. Hier wurde meist eine Verschlechterung der Sensitivität, also eine Erhöhung des ebenmerklichen Unterschieds gezeigt (Goldstein, 1996, S. 19, Gescheider, 1985, Kap. 1).

Während klassischer Weise ΔS als ebenmerklicher Unterschied bezeichnet wird, hat es sich als praktikabel herausgestellt, den konstanten Wert k als ebenmerklichen Unterschied in Prozent anzugeben, da dieser unabhängig von der Nennung des Standardreizbetrags angeführt werden kann. In dieser Arbeit wird ebenfalls durchgängig der Prozentwert berichtet.



4. Wahrnehmung und Einstellung von haptischen Akquisitions- und Übertragungsparametern unter Mitberücksichtigung der visuellen Modalität

Bereits im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, dass die Ausnutzung von menschlichen Wahrnehmungsschwellen und -lücken einen innovativen Ansatz darstellt, auch haptische Akquisitions- und Kommunikationsparameter zu justieren. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den haptischen Daten liegt, werden hier die Grundlagen der haptischen Wahrnehmung kurz erläutert.

Diese kann grob gegliedert werden in propriozeptive, taktile, Temperatur- und Schmerzempfindung (z.B. Loomis & Lederman, 1986; England, 1995; Seow, 1988; Birbaumer & Schmidt, 1986; Burdea, 1996).

Propriozeption bezeichnet die statische und dynamische Körperhaltung mit einhergehender Kraftausübung und dem wahrgenommenen Kraftwiderstand (Loomis & Lederman, 1986; England, 1995; Srinivasan & Chen, 1993). Die propriozeptive Wahrnehmung wird vermittelt über Mechanorezeptoren in der Skelettmuskulatur. Dazu gehören das Golgi-Sehnenorgan, das extrem sensitiv bei Muskelkontraktion und -spannung reagiert und der Hauptrezeptor für die Kraftwahrnehmung ist, die Muskelspindeln, die die Hauptrezeptoren für den Bewegungssinn (Kinästhesie) darstellen, und die Gelenkrezeptoren, die die Position der Gliedmaßen weitergeben und damit die Hauptrezeptoren für den Stellungssinn sind (England, 1995).

Bei der taktilen Wahrnehmung werden Informationen über externe Stimuli bei Berührung bzw. Kontakt über die Haut vermittelt und verarbeitet (Gibson, 1962; Loomis & Lederman, 1986). Mechanorezeptoren in der Haut vermitteln diese Eindrücke. Die wichtigsten Mechanorezeptoren in unbehaarter Haut sind:

Merkel-Zellen, die während der gesamten Darbietungsdauer reagieren und somit sensitiv für Druck und Langzeitinformationen über Hautveränderungen sind und eine gute räumliche Lokalisation aufweisen;

Ruffini-Körperchen, die ebenfalls über die gesamte Darbietungsdauer reagieren, jedoch eine geringe räumliche Lokalisation aufweisen;

Meissner-Körperchen, die nur zu Beginn der Reizdarbietung reagieren und daher sensitiv gegenüber Veränderungen, Bewegungen und konstanten Geschwindigkeiten sind und eine gute räumliche Lokalisation aufweisen und

Pacini-Körperchen, die ebenfalls nur zu Beginn der Reizdarbietung reagieren, jedoch eine schlechte räumliche Lokalisation haben (England, 1995, Birbaumer & Schmidt, 1986). Die taktilen Wahrnehmung ist dabei immer eine Kombination der Eindrücke, die von den verschiedenen taktilen Mechanorezeptoren vermittelt werden.

Die Temperaturwahrnehmung kann unterteilt werden in die Qualitäten Kältesinn und Wärmesinn. In der menschlichen Haut finden sich spezifische Kalt- und Wärmesensoren, die eine dauernde Kaltempfindung unterhalb 31°C bzw. eine dauernde Wärmeempfindung oberhalb 36° liefern (Birbaumer & Schmidt, 1986; England, 1995). Da die Thermorezeption nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, wird diese im Folgenden nicht betrachtet.

Die Schmerzwahrnehmung stellt eine Sonderform bei den Sinnessystemen dar, da Schmerz fast immer eine motivational-affektive Komponente hat, d.h. er wirkt als Antrieb zur Vermeidung. Die freien Nervenendigungen bzw. Nozizeptoren reagieren vor allem dann, wenn entweder von außen oder von innen kommende Reize dem Körper Schaden zuzufügen drohen (Brbaumer & Schmidt, 1986). Auch dieses Wahrnehmungssystem wird hier nicht tiefergehend behandelt, da es nicht Bestandteil dieser Arbeit ist.

Das in Abbildung 4.01 dargestellte Wahrnehmungsmodell gibt eine Übersicht über haptische Rückmeldungserfordernisse und den jeweils angesprochenen Mechanorezeptoren sowie deren wichtigste Eigenschaften (Pongrac & Färber, 2005; s. auch Johnson, 2002; Greenspan & Bolanowski, 1996; Johansson, Landström & Lundström, 1982a; Bolanowski, Gescheider, Verrillo & Checkosky, 1988; Caldwell, Lawther & Wardle, 1996; LaMotte & Srinivasan, 1989; Tan, Srinivasan, Eberman & Cheng, 1994; Shimoga, 1993b; Seow, 1988; Birbaumer & Schmidt, 1986; Goldstein, 2002; Johansson, Landström & Lundström, 1982b).

In der vorliegenden Arbeit wurden zu den Akquisitionsparametern, also zur Abtastung und Quantisierung, aus dem propriozeptiven Bereich die Untersuchung der Wahrnehmung und Einstellung von Kraft und Richtung ausgewählt, aus dem taktilen Bereich die der Wahrnehmung und Einstellung von vibrotaktilen Daten. Im Unterkapitel 4.1. wird die Einstellung von Kraft- und Richtungsdaten behandelt. Hier zeigt sich, dass die Unterschiedsschwelle für die Kraft, die zwischen 10 und 30% liegt, von der jeweiligen Richtung abhängt und die Sensitivität für die lateralen Richtungen abnimmt. Eine Überschreitung des ebenmerklichen Unterschieds führte nicht zu einer Abnahme der Aufgabenleistung, jedoch zu einem verminderten Präsenzempfinden. Die Wahrnehmung und Einstellung von vibrotaktilen Daten ist Gegenstand des Unterkapitels 4.2. Die in diesem Abschnitt durchgeführten Studien ergaben, dass der ebenmerkliche Unterschied für Frequenzen über vielfältige Reizkonfigurationen und Geräte konstant bei ca. 20% bleibt. Bei einer Überschreitung dieser Diskriminationsschwelle konnte eine Verschlechterung der Aufgabenleistung, nicht jedoch des Präsenzempfindens, verzeichnet werden.

Zu den Übertragungsparametern wurden die Kompression von Kraftdaten und die Effekte von Zeitverzögerung von haptischen und visuellen Daten betrachtet. Im Unterkapitel 4.3. zeigt sich, dass die Kompression haptischer Daten vor allem Effekte auf das Präsenzempfinden zeigt, wobei eine hohe Kompressionsrate erreicht werden konnte, ohne das Präsenzempfinden zu dämpfen. Auf die Aufgabenleistung zeigten sich nur sehr geringe negative Auswirkungen.

Die Zeitverzögerung von haptischen und visuellen Daten hat im Anschluss das Unterkapitel 4.4. zum Inhalt. Bereits bei geringen Verzögerungen ab etwa 150 ms zeigte sich eine Verschlechterung der Aufgabenleistung und des Präsenzempfindens. Variable Zeitverzögerungen wirkten sich dabei stärker aus als konstante Totzeiten.

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Kernpunkte im Detail bearbeitet.

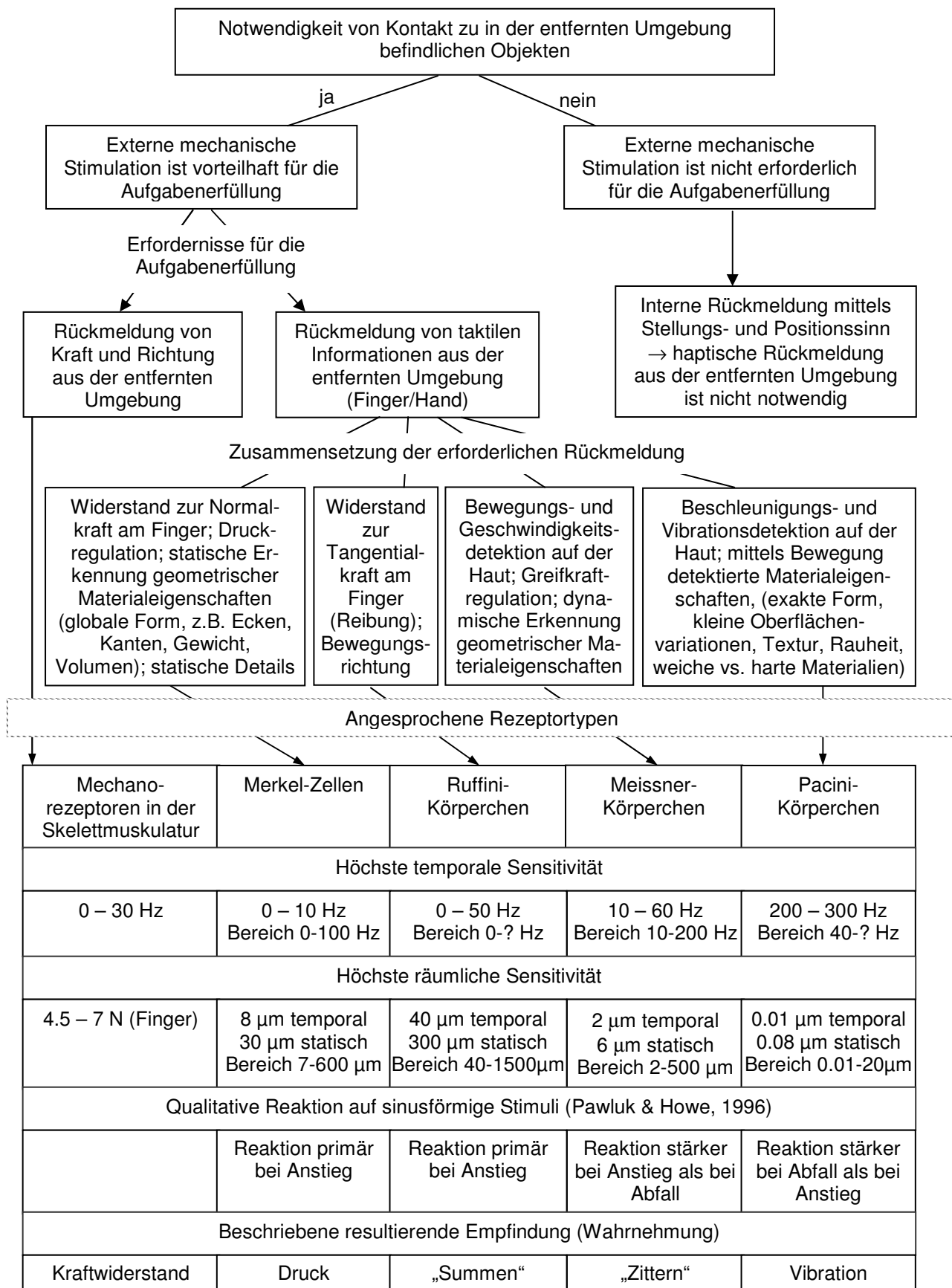
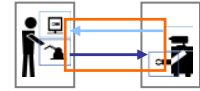


ABBILDUNG 4.01. Wahrnehmungsmodell zu haptischen Rückmeldungserfordernissen und die wichtigsten Eigenschaften der jeweils angesprochenen Rezeptoren.



4.1. Wahrnehmung und Einstellung von Kraft- und Richtungsdaten

In diesem Unterkapitel wird zunächst ein kurzer Überblick über Ergebnisse aus der bereits bestehenden Forschung gegeben. Im Anschluss daran wird eine theoretische Zusammenfassung zur Einstellung der Abtastfrequenz geliefert.

Für die Einstellung der Quantisierung für haptische Kraft- und Richtungsdaten wird nachfolgend das menschliche Auflösungsvermögen sowohl für Kraftdaten bei Konstanthaltung der Richtung, also der ebenmerkliche Kraftunterschied, als auch für Richtungsdaten bei Konstanthaltung der Kraft, der ebenmerkliche Richtungsunterschied, erforscht. Dabei werden verschiedene Variationen eingeführt, insbesondere wird der Einfluss des Interstimulusintervalls und der Sicht auf diese Unterschiedsschwellen untersucht. Ebenfalls wird die Quantisierungsart für Kraftdaten betrachtet.

Bei kraftrückmeldenden haptischen Ein- und Ausgabegeräten in Telepräsenz- und virtuellen Szenarien ist häufig die Rückmeldung von Kraftbetrag und -richtung nötig, um Eigenschaften von virtuellen oder entfernten Objekten abzubilden. Beispielsweise werden Widerstandskräfte über Kräfte dargestellt, die orthogonal zur betasteten Oberfläche stehen; Reibung und Viskosität über Kräfte, deren Richtung von der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit abhängen (Ho, Basdogan & Srinivasan, 1999; Pai, Doel, James, Lang, Lloyd, Richmond & Yau, 2001). Kanten werden ebenfalls durch die Änderung des Kraftbetrags von Null auf einen Betrag über Null wahrgenommen (Berger & Khosla, 1991; Freyberger, 2008).

Wie bereits in Kapitel 3 ausgeführt wurde, stellt die Ausnutzung menschlicher Wahrnehmungsschwellen auch bei haptischen Daten einen innovativen Ansatz für die Kompression und die Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten dar.

Während es viele Studien zur menschlichen Wahrnehmung des Kraftbetrags und zu Gewichtsunterschieden gibt, sind solche zur Wahrnehmung von Richtungsunterschieden und insbesondere zu Unterschieden, wenn sowohl die Kraft als auch die Richtung variiert werden, selten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Kodierung von Kraft- und Richtungsdaten, d.h. die dominante Wahrnehmungsdimension, wenn Kraft- und Richtungsdaten gleichzeitig variiert werden. Hier kommen zwei verschiedene Ansätze zum Einsatz. Zum einen wird das Interstimulusintervall auf 500 ms gesetzt, und der ebenmerkliche Kraft- und Richtungsunterschied wird gemessen, wenn die beiden zu vergleichenden Vektoren vom Nullpunkt aus gestartet werden. Zum anderen werden bei einem Interstimulusintervall von 0 ms die beiden Vektoren durch Vektoraddition verknüpft, so dass subjektiv nicht zwei aufeinander folgende Reize, sondern ein zusammengesetzter Stimulus beurteilt wird.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Einstellung des Quantisierungsintervalls und zur Kodierung von Kraft- und Richtungsdaten werden in einem abschließenden Experiment benutzt, um die Auswirkungen dieser Kommunikationsparameter auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben zu bestimmen. Bei dieser Untersuchung wird auch die visuelle Modalität mit einbezogen.

Die Ergebnisse werden zum Abschluss zusammengefasst und interpretiert, auf dieser Grundlage werden Gestaltungshinweise für Telepräsenz- und Teleaktionssysteme gegeben.

4.1.1. Theoretische Grundlagen

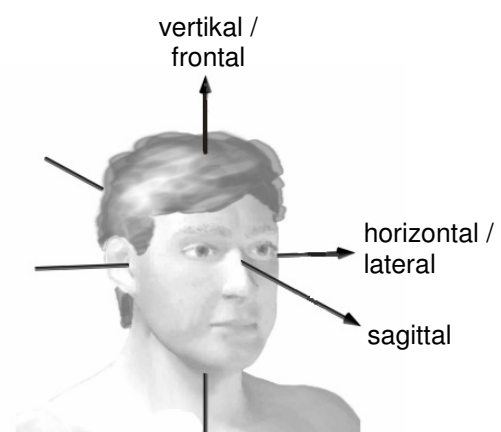
Die Forschung zur Kraft- und Gewichtswahrnehmung hat eine lange Tradition in der experimentellen Psychologie. Schon Weber untersuchte die Unterschiedsschwellen bei der Gewichtswahrnehmung (Jones, 1986). Mittlerweile wird übereinstimmend angenommen, dass bei der Wahrnehmung von Kraftbetrag und Gewicht dieselben haptischen sensorischen Systeme angesprochen werden und daher dieselben Werte für beide Parameter gelten (z.B. Jones, 1989; Tan, Pang & Durlach, 1992).

Studien zur Unterschiedsschwelle bei Kraftbeträgen finden übereinstimmend einen ebenmerklichen Unterschied zwischen 7 und 10% (Tan, Srinivasan, Eberman & Cheng, 1994; Srinivasan & Chen, 1993; Allin, Matsuoka & Klatzky, 2002; Pan, Tan & Durlach, 1991; Tan, Durlach, Shao & Wei, 1993; Jones & Hunter, 1990).

Bei den genannten Untersuchungen kommen die Autoren übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die menschliche Diskriminationsschwelle dem Weberschen Gesetz folgt und damit eine Abhängigkeit vom Referenzreiz besteht. Bei kleinen Kräften und Gewichten nahe der Detektionsschwelle findet eine Erhöhung der Unterschiedsschwelle statt (z.B. Brodie & Ross, 1986). Dieser Effekt ist auch für andere Wahrnehmungsdimensionen (z.B. Längendiskrimination, Nachgiebigkeitsdiskrimination etc.) gefunden worden (Goldstein, 1986; Gescheider, 1985).

Bei der haptischen Kraftdiskrimination wurden weiterhin zeitliche Maskierungseffekte gefunden, d.h. die Unterscheidungsschwelle für taktile Stimuli wurde erhöht, wenn die Reize direkt aufeinanderfolgend appliziert wurden (Craig, 1985; Kirman, 1973; Sherrick, 1964). Dagegen fanden Bliss, Crane, Mansfield & Townsend (1966) eine Spanne von 600 bis 800 ms beim sensorischen Ultrakurzzeitgedächtnis für taktile Daten, nach diesem Zeitraum verfällt die sensorische Information. Die Unterscheidungsfähigkeit sollte also nach dieser Spanne abnehmen (s. auch Berglund, Berglund & Ekman, 1967; Sinclair & Burton, 1996). Bei den Experimenten zu diesem Unterkapitel wurde daher stets ein Interstimulusintervall von entweder 0 ms oder von 500 ms verwendet.

Die haptische Richtungsdiskrimination ist ein weniger erforschtes Gebiet. Jones, Hunter & Irwin (1992) geben einen ebenmerklichen Unterschied von 8% für Gelenkbewegungen im Unterarm an. Keyson & Houtsma (1995) untersuchten die Richtungsänderungsschwelle an der rechten Zeigefingerspitze und berichten eine durchschnittliche Schwelle von 14° für Orientierungsänderungen. Die Schwelle war dabei am geringsten für sagittale Richtungen und am höchsten für laterale (horizontale) Orientierungen. Bei den lateralen Richtungen fanden sie keinen Unterschied zwischen der linken und der rechten Seite (horizontale Ebene).



Die Gruppe um das Projekt TouchHapSys untersuchte unter anderem die Diskriminationsleistung bei der Richtungswahrnehmung mit einem Pin an der Fingerspitze und erweiterte die Untersuchung auf bis zu vier Pins. Für sagittale Bewegungsrichtungen, v.a.

vom Handgelenk weg, fanden sie die höchste Sensitivität mit 23°. Diese erhöhte sich bis zu 35° für die lateralen Richtungen, wobei wiederum kein Unterschied zwischen rechter und linker Seite gefunden wurde. Im Vergleich von einem zu mehreren Pins (1, 2, 4) blieb die Schwelle relativ konstant zwischen 19° (1 Pin) bis 23° (4 Pins) für 0° und 180°, also für die sagittalen Richtungen (Drewing, Fritschi, Zopf, Ernst & Buss, 2005; Vitello, Wing & Hartwig, 2006; Bresciani et al., 2005).

Andere Forscher hingegen berichten von Ergebnissen bezüglich der Richtungsdiskriminierung, wonach diese Wahrnehmungsdimension nicht dem Weberschen Gesetz folgt, sondern unabhängig von der Standardrichtung konstant bleibt. Tan, Barbagli, Salisbury, Ho & Spence (2006) sowie Barbagli, Salisbury, Ho, Spence & Tan (2006) berichten eine konstante Richtungsdiskrimination bei 33° unabhängig von der Standardrichtung. Elhajj, Weersinghe, Dika & Hansen (2006) berichten von einer konstanten Schwelle von 15°.

Bezüglich der Verarbeitung von Orientierungen wurde für die visuelle Modalität ein „Oblique-Effekt“ identifiziert, wonach laterale Orientierungen eine höhere Sensitivität aufweisen als sagittale oder schräge Richtungen (z.B. Appelle, 1972; Esock, 1980). Diese Anisotropie ist auch für die haptische Modalität gefunden worden, jedoch kehrt sich die Sensitivität um. Diese ist am höchsten für sagittale Richtungen und am niedrigsten für horizontale oder schräge („oblique“) Orientierungen (z.B. Esock, Krebs & Prather, 1997; Gentaz & Hatwell, 1996; Baud-Bovy & Gentaz, 2006; Heller & Joyner, 1993, Pongrac, Reiter, Färber & Zäh, 2007).

Bei intersensorischen Interaktionen zwischen der haptischen und der visuellen Modalität wurden sehr häufig visuelle Dominanzeffekte gefunden. So überlagern beispielsweise visuell inkongruente Informationen die haptische Wahrnehmung und dominieren diese (Klatzky, Lederman & Langseth, 2003; Klatzky, Lederman & Reed, 1987; Welch & Warren, 1986; Ernst & Banks, 2002; Heller, Calgattera, Green & Brown, 1999; Srinivasan, Beauregard & Brock, 1996; Spence & Driver, 1997; für eine Übersicht s. Spence & Driver, 2004).

4.1.2. Standardapparatur und -verfahren

Es wird zunächst das verwendete haptische Ein-/Ausgabegerät vorgestellt, das PHANTOM Omni der Firma SensAble Technologies Inc. Danach wird der Algorithmus beschrieben, der für die Erhebung der Unterschiedsschwellen in allen Experimenten dieses Unterkapitels benutzt wurde. Für die Untersuchung der Auswirkungen der Einstellung der Kommunikationsparameter wurde eine Standardaufgabe verwendet, die im Anschluss beschrieben wird.

1. Das PHANTOM[®] Omni[™] der Firma SensAble Technologies Inc.

Das PHANTOM Omni ist ein haptisches Ein-/Ausgabegerät, mit dem es möglich ist, in virtuellen Umgebungen haptische Rückmeldung zu erhalten. Es hat einen Stylus, den man wie einen Stift halten kann und mit dem virtuelle Objekte berührt und manipuliert werden können. An dem Stylus befinden sich zwei Tasten, die bei der Programmierung frei belegt werden können. Abbildung 4.02 zeigt dieses Gerät.



ABBILDUNG 4.02. Das PHANTOM Omni Ein-/Ausgabegerät der Firma SensAble Technologies.

Die Eingabe ist in sechs Freiheitsgraden möglich (translatorisch und rotatorisch), die Kraftausgabe bzw. –rückmeldung erfolgt in drei Freiheitsgraden (translatorisch). Das PHANTOM besitzt einen Arbeitsraum von 16 (Breite) x 12 (Höhe) x 7 (Tiefe) cm. Die nominale Positionsauflösung liegt bei 0.055 mm. Die nominale maximal ausführbare Kraft wird mit 3.3 N angegeben, es ist aber auch möglich, Kraftrückmeldungen bis 10.0 N zu belegen. Die beiden von der Firma SensAble mitgelieferten haptischen Bibliotheken (HLAPI und HDAPI, SensAble Technologies Inc., 2001) können über die Programmiersprache C++ (insbesondere .NET) eingebunden werden und die darin enthaltenen haptischen Funktionen verwendet werden. Die haptische Rückmeldung wurde über das OpenHapticsToolkit (OpenHaptics Academic Edition, 2005) implementiert.

Es konnte gezeigt werden, dass das PHANTOM effektiv genutzt werden kann, um haptische Einstellungs- und Wahrnehmungsparemeter untersuchen zu können (Hesse & Wing, 1999; Jansson, Billberger, Petrie, Caldwell, Kornbrot, Fänger, König, Hardwick & Furner, 1999).

In dieser Arbeit wurden alle Aufgaben in virtueller Umgebung mit haptischer Rückmeldung über das PHANTOM durchgeführt.

2. Beschreibung des Algorithmus für die Untersuchung der menschlichen Wahrnehmungsschwellen für Kraft und Richtung (Erforschung der Grundlagen)³:

Die Kraft- und Richtungsstimuli zur Untersuchung der menschlichen Unterschiedsschwellen unter verschiedenen Bedingungen wurden psychophysisch untersucht und in jedem Experiment mit dem PHANTOM Omni vorgegeben. Die jeweiligen Standardreize unterschieden sich je nach Experiment und werden dort an entsprechender Stelle angegeben. In allen Kraft- und Richtungsexperimenten wurde derselbe in C++ erstellte Algorithmus verwendet, der im Folgenden näher beschrieben und begleitend illustriert wird.

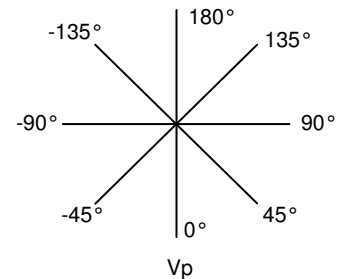
³ Besonderer Dank geht an Julius Kammerl für die Bereitstellung des Grundprogramms des Algorithmus.

Die untersuchte(n) Ebene(n) wurde(n) in acht Winkel aufgeteilt: 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , -135° , -90° und -45° . Zunächst wurde per Zufall ein Standardreiz (d.h. ein vorher bestimmter Kraftbetrag) ausgewählt.

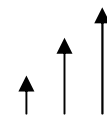
Für diesen Standardreiz wurde ebenfalls zufällig eine Seite (rechts: 0° , 45° , 90° , 135° und 180° bzw. links: 0° , -45° , -90° , -135° und 180° in der horizontalen Ebene) bestimmt. Von den fünf verbleibenden Winkeln wurde einer durch Zufallsentscheidung ausgewählt. Zunächst wurde ein Stimuluspaar mit der maximalen Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz vorgegeben, bei richtiger Antwort wurde die Differenz sukzessive so lange verringert, bis die Versuchsperson angab, keinen Unterschied mehr zwischen den beiden Reizen wahrzunehmen. Danach wurde derselbe Vergleichsreiz wie der Standardreiz vorgegeben und die Differenz schrittweise so lange vergrößert, bis die Versuchsperson einen Unterschied entdeckte. Falls die Antwort gleich beim ersten Paar falsch war („gleich“ bei maximaler Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz), wurde die Prozedur abgebrochen und das Paar wurde zuerst ohne Differenz (von unten) und danach wieder von oben vorgegeben (adaptive Grenzmethode). Bezüglich der Erhöhung bzw. Erniedrigung der Differenz gab es zwei Gruppen, die jeweils auch per Zufall zugewiesen wurden. In beiden Gruppen wurden die Stufen um jeweils 10% erhöht, jedoch enthielt die eine Gruppe die 10er-Reihe und die andere Gruppe die 5er-Reihe.

Nachdem der Winkel abgearbeitet war, wurde der nächste Winkel für denselben Standardreiz und dieselbe Seite per Zufall ausgewählt und dieselbe Prozedur wurde wiederholt, bis alle fünf Winkel bestimmt waren. Danach wurde der nächste Standardreiz zufällig ausgewählt und derselbe Algorithmus angewandt, bis alle Standardreize gemessen waren. Dieser Algorithmus wurde verwendet, um zum einen eine Schrittweite von 5% und Messwerte für beide horizontalen Seiten der Ebene zu erhalten und andererseits die Anzahl der Kraftpaare, die jedem Probanden präsentiert wurde, um 50% zu reduzieren.

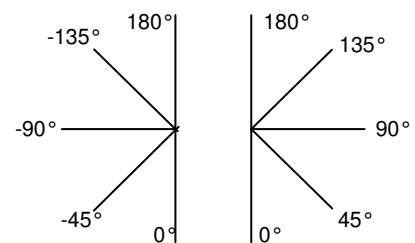
Die Reizdarbietungsdauer betrug sowohl für den Standardreiz als auch für den Vergleichsreiz stets 2000 ms.



Aufteilung der Ebene aus der Sicht der Versuchsperson



Auswahl des Standardreizes



Auswahl einer Seite

0, 10, 20, 30...	0, 5, 15, 25...
------------------	-----------------

Auswahl der Gruppe der Differenzschritte für den Vergleichsreiz [%]

3. Beschreibung der Aufgabe für die Untersuchung der Auswirkung der ermittelten Quantisierung für Kraft und Richtung

Mit dem Stylus des PHANTOMs sollten verschiedene Bahnen auf einer virtuellen Kugel abgefahren werden. Dabei wurde sowohl visuelle als auch haptische Rückmeldung gegeben. Die Versuchspersonen wurden stets instruiert, die vorgegebene Bahn so schnell und genau wie möglich abzufahren und dabei immer den Kontakt zur Kugeloberfläche zu halten. Zur besseren Orientierung wurden zweidimensionale Linien auf die Kugeloberfläche projiziert. Die Spitze des Stylus wurde virtuell als Kegel dargestellt, der hinter der Kugel nicht sichtbar war.

Es wurden zwei verschiedene Arten von Trackingbahnen realisiert. Im Experiment zur Auswirkung der ermittelten Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten wurde eine Ellipse auf die Kugeloberfläche gezeichnet, die die Versuchspersonen nachfahren sollten. In der Untersuchung zur Kompression von Kraftdaten sollten die Versuchspersonen verschiedene Großkreise auf der Kugel abfahren, diese wurden ebenfalls durch die graphische Darstellung von Linien angedeutet. Die Abbildung 4.03 zeigt diese beiden Aufgabentypen.

Die visuelle Ausgabe erfolgte dabei immer über einen 19“-TFT-Monitor.

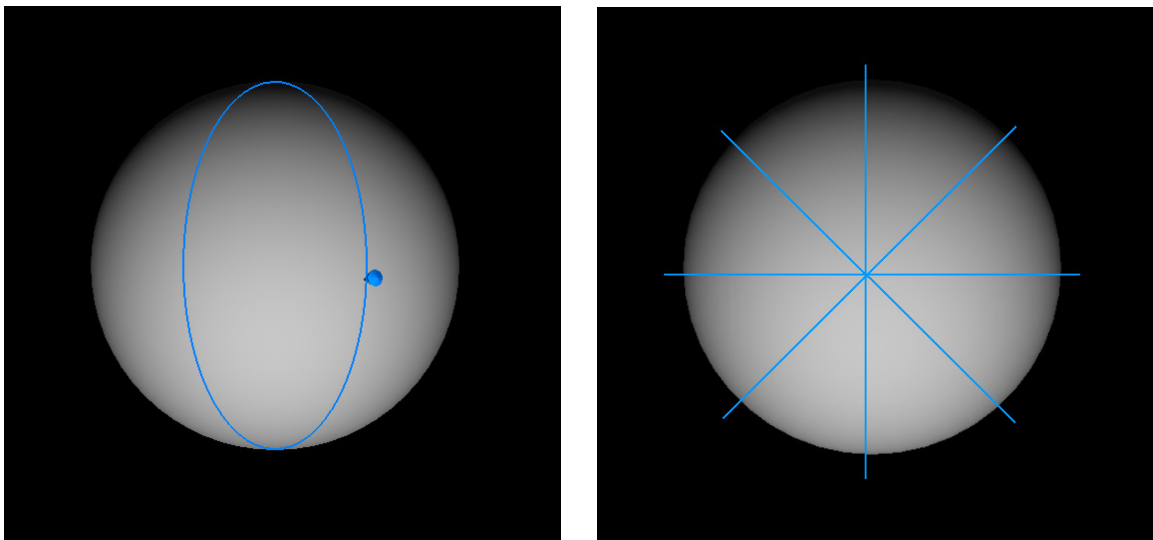


ABBILDUNG 4.03. Realisierte Trackingbahnen auf der Oberfläche der virtuellen Kugel.

4.1.3. Abtastfrequenz

Bei der Einstellung der Abtastfrequenz für Kraft- und Richtungsdaten müssen zunächst die Systemanforderungen und die Umgebungseigenschaften beachtet werden. Auf Systemebene gibt es eine optimale Abtastfrequenz für Eingangs- und Ausgangssignale, um die Variationen beim Impulsansprechverhalten gering zu halten. Die untere Grenze ist dabei die Nyquist-Rate (s. Kap. 3), die obere Grenze hängt von der numerischen Instabilität der Abtastung ab (Sano & Tsuji, 1993). Die Abtastfrequenz beeinflusst technische Systeme bezüglich Umschaltverlusten von Invertern, Oberschwingungsverlusten und Momentübertragung der Motoren. Die für technische Systeme optimale Abtastfrequenz muss nicht zwangsläufig die

minimal mögliche sein, sondern sollte in Relation zur Kostenfunktion in Abhängigkeit der Wichtigkeit bestimmter Systemeigenschaften berechnet werden (Kaboli, Zolghadri & Homaifar, 2003).

In Studien zu manipulativen Aufgaben in virtuellen und entfernten Umgebungen zeigte sich, dass die Abtastrate an die Umgebungssteifigkeit angepasst werden muss, um stabile Operationen ohne Oszillation v.a. bei harten Kontakten zu gewährleisten. Bei einer Umgebungssteifigkeit von 6.7 kN/m zeigte sich eine Abtastrate von 100 Hz als ausreichend, bei einer Umgebungssteifigkeit von 70 kN/m war eine Abtastrate von 1000 Hz notwendig (Hasegawa, Ishii, Sato & Koike, 2000). Mit zunehmender Abtastfrequenz erscheint eine virtuelle bzw. entfernte Wand härter (Colgate & Brown, 1994). Die allgemeine Beurteilung der Wandqualität durch Versuchspersonen hängt jedoch nicht so sehr von der anfänglichen Kontaktphase ab, sondern eher von der Oberflächenhärte und der sauberen Loslösung von der Oberfläche (Rosenberg & Adelstein, 1993).

Bei einer Studie zur Aufprallkontrolle in einer entfernten Umgebung konnte gezeigt werden, dass der Aufprall gegen eine harte Aluminiumplatte bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten bei einer Abtastfrequenz von 2500 Hz oszillierte, nicht jedoch bei einer Abtastrate von 1000 Hz. Die Hauptfrequenz des Aufpralls lag hier bei etwa 1000 Hz, was bei einer Abtastung von 1000 Hz nicht dargestellt werden konnte. Um unverfälschte Signale und geringe Oszillationen zu erhalten, muss die Abtastrate entweder sehr hoch sein oder die Geschwindigkeit des Aufpralls gering gehalten werden (Mandal & Payandeh, 1995).

Bisher realisierte Lösungsansätze sind die Implementierung von aktiver Nachgiebigkeit in das System (wodurch niedrige Aufprallfrequenzen erreicht werden), die Steifigkeitskontrolle der Umgebung oder die Anpassung der Abtastfrequenz. Bei zu kleinen Abtastraten wird das System zunehmend instabil, bei zu hohen Abtastraten steigt die Zeitverzögerung durch die Verarbeitung der größeren Datenmenge an (Mandal & Payandeh, 1995; Katsura, Matsumoto & Ohnishi, 2003; Colgate, Stanley & Schenkel, 1993; Colgate, Grafing, Stanley & Schenkel, 1993; Colgate, Stanley & Brown, 1995).

Moon (1996) produzierte künstliche Sinus- und Dreieckswellen jeweils mit einer Schwingung von 500 Hz und variierte die Abtastfrequenz. Bei einer Abtastrate von 1000 Hz stellte er eine Amplitudenverzerrung fest, die reproduzierte Amplitude fiel geringer aus als die Amplitude des Originalsignals. Scharfkantige Wellen erforderten insgesamt eine höhere Abtastung als runde Wellenformen. Bei den Sinuswellen war eine Abtastfrequenz von 5000 Hz (zehnfache Abtastung) notwendig, um eine maximalen Abweichung von 5% vom Originalsignal nicht zu überschreiten, bei den Dreieckswellen war dafür eine Abtastrate von 10000 Hz notwendig (20fache Abtastung).

Die realisierte Abtastfrequenz ist somit immer ein Kompromiss zwischen erforderlicher Rechenleistung, Systemstabilität, Wiedergabetreue und Systemresponsivität (Choi & Tan, 2004a; Katsura, Matsumoto & Ohnishi, 2003).

Brooks (1990) empfiehlt bei haptischen Daten mindestens die zehn- bis 20fache Abtastfrequenz der höchsten auftretenden Frequenz bei der auszuführenden Aufgabe. Dieses Verhältnis sollte bei harten Kontakten erhöht werden. Shimoga (1993a) gibt als Faustregel an, nach der Abtastung das Zehnfache der benötigten Bandbreite zur Verfügung zu stellen und empfiehlt eine Abtastfrequenz von 300 Hz für Kraftdaten.

In der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses der Abtastfrequenz auf die menschliche Wahrnehmung mit dem PHANTOM Omni nicht möglich, da das Gerät schon bei kleinen Änderungen der Abtastrate Instabilitäten zeigte.

Dieser Einfluss der Abtastfrequenz wurde in telemanipulativen und virtuellen Systemen bisher kaum untersucht. Adachi, Kumano & Ogino (1995) überprüften die benötigte Abtastfrequenz beim Berühren und beim Nachführen einer Kontur einer harten, gekrümmten Oberfläche in einer virtuellen Umgebung mit einer Versuchsperson. Sie variierten die Abtastfrequenz in den Stufen 500, 250 und 167 Hz. Die Versuchsperson konnte bei 500 Hz problemlos die Oberfläche berühren und der Spur folgen, bei den niedrigeren Frequenzen traten unangenehme Vibrationen und oszillierendes Trackingverhalten auf. Mit langsameren Bewegungen des Fingers (8 mm/s statt 20 mm/s) konnten diese negativen Effekte kompensiert werden. Bei harten Objekten sollte die Abtastfrequenz also mindestens 500 Hz betragen.

Choi & Tan (2005) untersuchten mit drei Versuchspersonen die Aufgabenleistung bei der haptischen Unterscheidung von virtuellen Texturen mit verschiedenen Abtastfrequenzen. Sie variierten sowohl die Abtastfrequenz als auch die Systemstabilität. Die Versuchspersonen sollten Paarvergleiche zwischen gleichen Texturen ziehen, die mit unterschiedlicher Abtastrate und Stabilität dargeboten wurden: 300 Hz instabil vs. 1000 Hz stabil und 1000 Hz stabil und 10000 Hz stabil. Es zeigte sich, dass keine Unterschiede bezüglich der Abtastrate wahrgenommen wurden, solange keine Instabilität vorlag. Die Versuchspersonen beschrieben die Wahrnehmung der Instabilität als „Summen“.

Minsky, Ouh-Young, Steele, Brooks & Behensky (1990) simulierten harte Oberflächen in virtuellen Umgebungen, wobei das System mit einer Abtastrate von 1000 Hz stabil, mit einer solchen von 250 Hz instabil und mit 100 Hz stabil war. Aufgabe der Versuchspersonen (die Größe der Stichprobe ist in der Studie nicht angegeben) war es, mit einem Joystick gegen die harte Oberfläche zu stoßen und diese zu beurteilen. Sie nahmen bei 100 Hz dieselbe harte Oberfläche wahr wie bei 1000 Hz, wieder war der ausschlaggebende Faktor die Stabilität des Systems. In einem zweiten Experiment zeigte sich, dass bei einer Abtastfrequenz von 357 Hz die Oberfläche bei tangentialen Bewegungen immer als instabil, bei sagittalen Aufprallbewegungen immer als stabil wahrgenommen wurde. Weiterhin konnten Unterschiede zwischen Abtastfrequenzen von 500 Hz und 1000 Hz nur dann wahrgenommen werden, wenn die Simulation instabil wurde.

Auch Brooks, Ouh-Young, Batter & Kilpatrick (1990) stellten bei haptischen Displays fest, dass Versuchspersonen eine Zunahme der Abtastfrequenz von 500 Hz auf 1000 Hz entdecken können, wenn bei 500 Hz Systeminstabilitäten auftraten. Der Unterschied wurde nicht wahrgenommen, wenn das System bei beiden Abtastraten stabil blieb.

Choi & Tan (2004a) konnten bei der Simulation von haptischen virtuellen Texturen zeigen, dass das verwendete Eingabegerät (in diesem Fall ein PHANTOM Desktop) bei bestimmten Abtastfrequenzen eine höherfrequente spektrale Komponente (Oberschwingung) beinhaltet. Wenn diese in einen für Menschen spürbaren Bereich fallen (in diesem Fall Kraftsignale von 80 Hz, Abtastrate 300 Hz, Oberschwingung bei 220 Hz), werden diese als zusätzliche Vibrationen oder „Summen“ wahrgenommen und können störend wirken. Die Autoren konnten mit zwei Versuchspersonen bestimmen, dass eine Mindestabtastrate von 5000 bis

10000 Hz notwendig war, um keine Oberschwingungen im wahrnehmbaren Bereich zu erhalten.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Abtastfrequenz mindestens das Doppelte der für die Aufgabenerfüllung notwendigen Bandbreite betragen sollte. Der kritische Parameter, der jedoch bei der Abtastung wahrgenommen wird, ist vor allem die Instabilität des Systems. Die Abtastrate sollte immer so gewählt werden, dass keine Systeminstabilitäten auftreten.

4.1.4. Quantisierungsintervall für Kraft- und Richtungsdaten

Um das menschliche Auflösungsvermögen bezüglich Kraft- und Richtungsdaten für deren Quantisierung nutzen zu können, wurden diese anfangs in zwei Experimenten bestimmt. In der ersten Studie wurde der ebenmerkliche Unterschied für Kraftdaten ermittelt, dabei wurde die Richtung jeweils konstant gehalten. Das Ziel war es, den ebenmerklichen Unterschied nur für die Krafrückmeldung in Abhängigkeit von verschiedenen Richtungen angeben zu können.

Im zweiten Experiment wurde der ebenmerkliche Unterschied für Richtungsdaten erforscht. Die Kraftausgabe wurde konstant gehalten, während die Richtung variiert wurde. Hier sollte der ebenmerkliche Unterschied nur für Richtungsdaten in Abhängigkeit von verschiedenen Kraftbeträgen gemessen werden.

4.1.4.1. Bestimmung des ebenmerklichen Kraftunterschieds bei Konstanthaltung der Richtung

Für die Berechnung des ebenmerklichen Kraftunterschieds in Abhängigkeit von verschiedenen Richtungen wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die Kraft systematisch variiert wurde, während die ausgewählte Richtung jeweils konstant blieb.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Für die Prozedur wurde der oben beschriebene Algorithmus verwendet. Als Standardreize wurden die Kraftbeträge 1.0, 1.5 und 2.0 N jeweils in der Horizontalebene gewählt. Für 1.5 N wurde zusätzlich als Vergleichsreize die zur Horizontalebene orthogonal stehende Frontalebene gewählt, dies diente als zusätzliche Kontrolle, da sich die beiden Ebenen hinsichtlich der Unterschiedsschwelle nicht unterscheiden sollten. Den Versuchspersonen wurde zuerst der Standardreiz dargeboten, das PHANTOM wurde dann auf die Nullposition zurückgesetzt, schließlich wurde der Vergleichsreiz präsentiert. Der Vergleichsreiz zeigte immer in dieselbe Richtung wie der Standardreiz, hier wurde nur der Kraftbetrag variiert. Die maximale Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz betrug in diesem Experiment 60%. Die Versuchsperson sollte entscheiden, ob die beiden Reize „gleich“ oder „verschieden“ waren.

Zusätzlich wurde das Interstimulusintervall zwischen Standard- und Vergleichsreiz in zwei Stufen variiert (0 ms vs. 500 ms). Das Interstimulusintervall wurde blockweise vorgegeben, die Blöcke wurden über die Versuchspersonen balanciert. Um den Einfluss der Sicht auf die haptische Wahrnehmung für diesen Versuch zu untersuchen, wurde der



Standard- und Vergleichsreiz
(Kraftbeträge) am Beispiel 135°

Hälfte der Versuchspersonen ein Sichtschutz angelegt. Dieser Faktor wurde vollständig über die beiden Probandengruppen balanciert.

Am Ende füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM (Rating von keine bis sehr viel in fünf Stufen), Spielen eines Saiteninstruments und wenn ja, welches, über welche Zeitdauer und durchschnittliche Übungsstunden pro Monat, enthielt.

Methode

a) Design

Als abhängige Variable wurde der ebenmerkliche Unterschied bezüglich der Kraftwahrnehmung für jeden Winkel einzeln erhoben.

Die unabhängigen Variablen waren die acht Winkel, die drei Standardkraftbeträge (1.0, 1.5 und 2.0 N), das Interstimulusintervall (0 ms vs. 500 ms) und Sichtschutz (ja vs. nein) [8 x 3 x 2 x 2 – Design].

Als zusätzliche unabhängige Variable diente die Orthogonalebene zur Standardkraft 1.5 N.

Außerdem wurden drei Faktoren, die durch die Anwendung des Algorithmus zustande kamen, eingeführt. Der Faktor „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ (mit vs. ohne) drückt aus, ob für eine Versuchsperson nur die linke oder nur die rechte Seite (ohne Wiederholung) oder beide Seiten (mit Wiederholung) der Ebene erhoben wurde. Durch die Hinzunahme dieses Faktors lässt sich bestimmen, ob sich die beiden Gruppen der Versuchspersonen unterscheiden. Mit Hilfe des zweiten Faktors „Seite“ kann eine Analyse bezüglich der Symmetrie bei der Wahrnehmung geliefert werden. Beim dritten Faktor „Stufe“ wird überprüft, ob die Gruppe, die die 5er-Reihe als Vergleichsreizstufen erhalten hatte, sich von der Gruppe mit der 10er-Reihe unterscheidet.

b) Stichprobe

23 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 47 Jahren nahmen an dem Versuch teil. Drei Versuchspersonen mussten ausgeschlossen werden, da weniger als die Hälfte der Schwellen bestimmt werden konnten. Für die weitere Analyse verblieben somit 20 Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 27 Jahren (mittleres Alter 24.70 Jahre, Standardabweichung 2.67 Jahre). Darunter befanden sich zwei Frauen und 18 Männer. Alle waren Rechtshänder. 15 von ihnen gaben an, keine oder wenig Erfahrung mit dem PHANTOM zu haben, fünf hatten mittlere bis sehr viel Erfahrung mit diesem Eingabegerät. Zwei von ihnen spielten ein Saiteninstrument mit einer Spieldauer von 1 bzw. 2 Jahren und jeweils einer durchschnittlichen Übungsdauer von 8 Stunden im Monat.

Ergebnisse

Der ebenmerkliche Unterschied wurde berechnet aus dem Mittelwert der Übergänge, d.h. dem Mittel zwischen dem Wert der letzten „gleich“- und der ersten „verschieden“-Nennung, wenn das Paar von oben vorgegeben wurde und zwischen der letzten „verschieden“- und der ersten „gleich“-Nennung, wenn Standard- und Vergleichsreiz von unten vorgegeben wurden. Dabei wurde der prozentuale Unterschied zum Standardkraftbetrag erhoben. Nicht determinierbare

Schwellen („gleich“-Nennung bei maximaler Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz bzw. „verschieden“-Nennung bei Gleichheit des Paares) wurden ausgeschlossen. Durch den Ausschluss dieser Schwellen konnten beim Interstimulusintervall 0 ms von insgesamt 1440 Paaren 1025 ausgewertet werden (durchschnittlich 51.25 Paare pro Versuchsperson; Range 38-60; pro Versuchsperson maximal 72 Paare möglich); beim Interstimulusintervall 500 ms waren von insgesamt 1440 Paaren 1096 auswertbar (Durchschnitt 54.80 pro Versuchsperson; Range 48-60; auch hier pro Versuchsperson maximal 72 Paare möglich). Die Daten der Orthogonalebene wurden in der Analyse nur dann verwendet, wenn dies explizit angegeben ist.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Der Gesamtmittelwert des ebenmerklichen Kraftunterschieds betrug 24% mit einer Standardabweichung von 4%. Die deskriptiven Werte für die einzelnen Faktoren sind in der folgenden Tabelle 4.01 angegeben.

TABELLE 4.01. Deskriptive Werte des ebenmerklichen Kraftunterschieds in % für die einzelnen Faktoren.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
Sichtschutz	nein	23	4	10
	ja	24	4	10
Interstimulusintervall	0 ms	25	5	20
	500 ms	22	5	20
Standardkraft	1.0 N	26	6	20
	1.5 N	23	5	20
	2.0 N	22	4	20
Winkelbetrag	0°	12	2	20
	45°	32	8	20
	90°	30	8	20
	135°	31	7	20
	180°	12	2	20
Ebene	Standard	29	6	20
	orthogonal	30	7	20

Zwischen den demographischen Daten und den individuellen Kraftunterschiedsschwellen konnten keine signifikanten Korrelationen gefunden werden, die Diskrimination von Kraftdaten ist also unabhängig von Alter, Geschlecht oder Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM. Da alle Probanden Rechtshänder waren und nur zwei Angaben, ein Saiteninstrument zu spielen, wurden für diese Daten keine Korrelationsanalysen vorgenommen.

2. Einfluss der Algorithmusfaktoren

Durch die Anwendung des Algorithmus gab es bezüglich der Seite (rechts vs. links in der horizontalen bzw. frontalen Ebene) zwei Gruppen: eine Gruppe von Versuchspersonen erhielten durch die zufällige Zuweisung beide Seiten, eine andere Gruppe erhielt nur die linke oder nur die rechte Seite für jeweils eine Standardkraft. Der Algorithmusfaktor „Seite“ kam somit als Gruppierungsfaktor (zwischen Vpn) oder als

Messwiederholungsfaktor (innerhalb Vpn) vor. Beide Versuchspersonengruppen hatten jeweils die Winkel 0° und 180° .

In einer einfaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde für die beiden Interstimulusintervalle getrennt und für die Winkel 0° und 180° bestimmt, ob sich diese beiden Gruppen von Versuchspersonen hinsichtlich ihres ebenmerklichen Unterschieds für Kraft unterscheiden. Die deskriptiven Werte sind der Tabelle 4.02 zu entnehmen.

Beim Interstimulusintervall 0 ms erwies sich der Faktor „Messwiederholung bzgl. der Ebene“ als nicht signifikant, $F(1,71) = 2.08$, $\eta^2 = .028$, $p = .154$; beim Interstimulusintervall 500 ms war der Faktor ebenfalls nicht signifikant, $F(1,80) = 0.10$, $\eta^2 = .001$, $p = .752$. Die beiden Versuchspersonengruppen unterscheiden sich also nur zufällig voneinander, die Werte dürfen somit zusammengefasst werden.

TABELLE 4.02. Deskriptive Werte in % bezüglich der Messwiederholung Ebene beim ebenmerklichen Kraftunterschied.

Winkel		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
<i>Interstimulusintervall 0 ms</i>				
0°	zwischen Vpn	12	4	36
	innerhalb Vpn	12	3	37
180°	zwischen Vpn	11	4	36
	innerhalb Vpn	13	8	37
<i>Interstimulusintervall 500 ms</i>				
0°	zwischen Vpn	12	4	25
	innerhalb Vpn	11	4	57
180°	zwischen Vpn	12	4	25
	innerhalb Vpn	12	3	57

Mit den restlichen Winkeln und für die Faktoren „Seite“ und „Stufen“ wurde eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung für die beiden Interstimulusintervalle getrennt und für die Winkel 45° , 90° und 135° bzw. -45° , -90° und -135° mit der abhängigen Variablen ebenmerklicher Unterschied für Kraft berechnet (die Daten für die Orthogonalebene wurden in diese Analyse einbezogen). Die deskriptiven Werte sind in Tabelle 4.03 aufgeführt.

TABELLE 4.03. Deskriptive Werte in % bezüglich der Faktoren „Seite“ und „Stufen“ beim ebenmerklichen Kraftunterschied.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
<i>Interstimulusintervall 0 ms</i>				
Seite	links	36	9	60
	rechts	30	15	46
Stufe	5er-Reihe	29	9	17
	10er-Reihe	31	18	31
	5er- + 10er-Reihe	35	7	58
<i>Interstimulusintervall 500 ms</i>				
Seite	links	30	12	62
	rechts	25	11	64
Stufe	5er-Reihe	24	10	18

10er-Reihe	30	10	15
5er- + 10er-Reihe	28	10	93

Für beide Interstimulusintervalle (ISI) zeigte sich weder für den Faktor „Seite“ noch für den Faktor „Stufen“ eine Signifikanz:

$$F_{\text{SEITE, ISI=0 ms}}(1,101) = 3.87, \eta^2 = .037, p = .052;$$

$$F_{\text{STUFEN, ISI=0 ms}}(2,101) = 2.23, \eta^2 = .042, p = .113;$$

$$F_{\text{SEITE, ISI=500 ms}}(1,122) = 2.44, \eta^2 = .020, p = .121;$$

$$F_{\text{STUFEN, ISI=500 ms}}(2,122) = 0.39, \eta^2 = .006, p = .679.$$

Die Gruppen mit den 5er- und 10er-Reihen dürfen somit zusammengefasst werden.

Die Nicht-Signifikanz des Faktors „Seite“ bedeutet, dass die Unterschiedsschwelle für Kraft symmetrisch ist, diese sich also bezüglich der lateralen Ebene nicht unterscheidet. Für die folgenden Analysen werden die linke und die rechte Seite daher zusammengefasst.

3. Einfluss der unabhängigen Variablen

Um den Einfluss der experimentellen unabhängigen Variablen auf den ebenmerklichen Unterschied für Kraft zu untersuchen, wurde eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Interstimulusintervall (0 ms vs. 500 ms), Standardkraftbetrag (1.0 N, 1.5 N, 2.0 N), Winkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135°, 180°) jeweils als Messwiederholungsfaktoren und Sichtschutz (ja vs. nein) als Gruppierungsfaktor und der abhängigen Variablen ebenmerklicher Kraftunterschied in % berechnet. Da bei dieser Analyse lediglich die Haupteffekte interessieren, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur diese als Ergebnisse der Varianzanalyse in Tabelle 4.04 dargestellt.

TABELLE 4.04. Ergebnisse der Varianzanalyse.

Quelle	df	F	η^2	p
zwischen Vpn				
Sichtschutz	1	0.78	.041	.390
Fehler	18	(588.25)		
innerhalb Vpn				
Interstimulusintervall	1	11.89*	.398	.003
Fehler	18	(192.09)		
Standardkraftbetrag	2	9.14*	.337	.001
Fehler	36	(98.49)		
Winkelbetrag	4	109.82 ^{a*}	.859	< .000
Fehler	72	(264.92)		

Werte in Klammern. Fehlerquadratsumme

a. korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*, signifikant

Der ebenmerkliche Unterschied differierte nicht für den Faktor Sichtschutz, d.h. es war unerheblich, ob die Probanden die Bewegungen des PHANTOMs sehen konnten oder nicht.

Bezüglich der beiden Interstimulusintervalle zeigten sich signifikante Unterschiede, generell war der ebenmerkliche Unterschied höher bei einem Interstimulusintervall von 0 ms als bei einem von 500 ms. Die Versuchspersonen waren also sensitiver bei einem größeren Intervall. Dies entspricht den Erwartungen (s. Kap. 4.1.1.).

Der ebenmerkliche Kraftunterschied differierte signifikant zwischen den drei Standardkraftbeträgen. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test zeigte, dass sich 1.0 N signifikant von den anderen beiden Kraftbeträgen abhob ($p = .001$ bzw. $p = .046$), während die beiden Beträge 1.5 N und 2.0 N keine signifikante Differenz beim ebenmerklichen Unterschied aufwiesen ($p = .378$). Dieses Ergebnis ist überraschend und ein Hinweis darauf, dass sich der Kraftbetrag von 1.0 N bereits nahe der absoluten Wahrnehmungsschwelle befindet, an deren Grenzen der Weberbruch bei vielen Modalitäten und Reizen nicht mehr konstant ist, sondern eher zunimmt (Goldstein, 1996; Gescheider, 1985).

Der Faktor mit der größten Effektstärke war der Winkel. Mittels Bonferroni-Test zeigte sich hier, dass sich der ebenmerkliche Unterschied für 0° und 180° nicht unterschied ($p = 1.000$), ebenso gab es keinen signifikanten Unterschied für 45° , 90° und 135° ($p = 1.000$ bzw. $p = .800$). Diese beiden Winkelgruppen unterschieden sich jedoch signifikant voneinander, $p < .000$.

Es zeigt sich also, dass der ebenmerkliche Kraftunterschied in die Richtung 0° und 180° den Werten, die bereits in der Literatur gefunden wurden, entspricht (z.B. Jones, 1989). In die lateralen Richtungen findet jedoch eine Erhöhung des ebenmerklichen Unterschieds statt, die Sensitivität nimmt demnach ab. Dieser Effekt wurde ebenfalls erwartet.

Für die Überprüfung der Äquivalenz der Orthogonalebene, die für den Standardkraftbetrag von 1.5 N zusätzlich erhoben wurde, wurde eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Interstimulusintervall (0 ms vs. 500 ms), Winkel (45° , 90° , 135°), Ebene (Standard vs. orthogonal) jeweils als Messwiederholungsfaktoren und Sichtschutz (ja vs. nein) als Gruppierungsfaktor durchgeführt.

Neben den oben genannten Effekten für Interstimulusintervall, Winkel und Sichtschutz ergab sich bei den Ebenen kein signifikanter Unterschied, $F(1, 18) = 1.51$, $\eta^2 = .077$, $p = .235$, es kann also eine Symmetrie in der horizontalen und frontalen Ebene beim ebenmerklichen Kraftunterschied angenommen werden.

4. Bestimmung der dreidimensionalen Form des ebenmerklichen Kraftunterschieds bei Konstanthaltung der Richtung

Aus den vorangegangenen Analysen kann nun durch folgende Rechenschritte die dreidimensionale Form des ebenmerklichen Kraftunterschieds berechnet werden:

- Zusammenfassung der Werte für den Faktor Sichtschutz;
- Trennung nach Interstimulusintervall (0 ms vs. 500 ms);
- Trennung nach Standardkraft (1.0 N vs. 1.5 und 2.0 N);
- Zusammenfassung der Werte für die beiden Seiten;
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Stufen“;
- Zusammenfassung der Winkel 0° und 180° ;

- Zusammenfassung der Winkel 45° , 90° und 135° (zusammengefasst aus Standard- und Orthogonalebene);
- dreidimensionale Darstellung durch Rotation um die y-Achse.

Die folgende Graphik 4.04 veranschaulicht den ebenmerklichen Kraftunterschied bei Konstanthaltung der Richtung nach den eben genannten Berechnungsschritten.

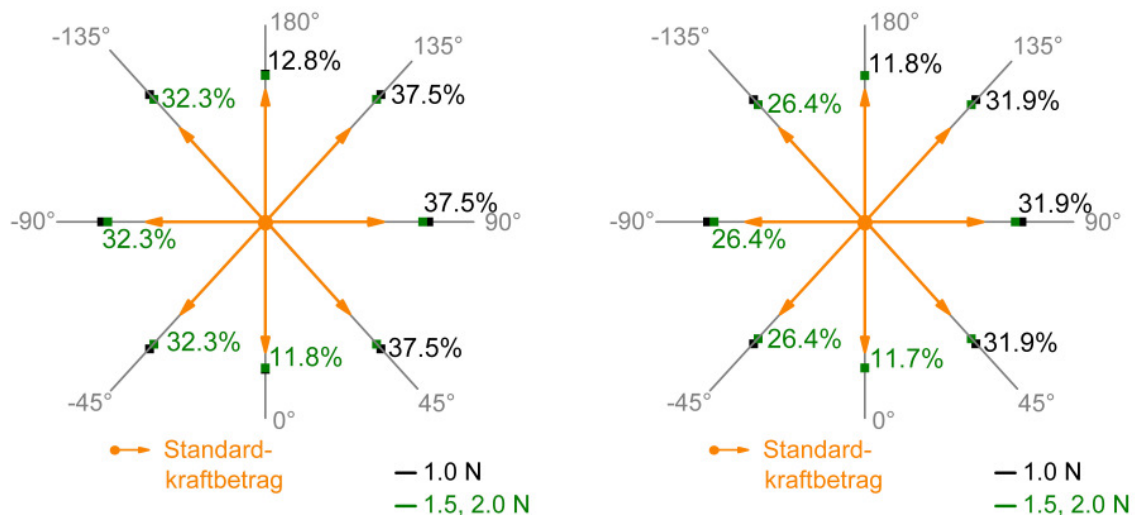


ABBILDUNG 4.04. Zweidimensional dargestellte Unterschiedsschwellen für Kraftbetrag bei konstanter Richtung, links: Interstimulusintervall 0 ms, rechts: Interstimulusintervall 500 ms. Die dreidimensionale Darstellung erhält man durch Rotation um die Ordinate.

4.1.4.2. Bestimmung des ebenmerklichen Richtungsunterschieds bei Konstanthaltung der Kraft

Für die Berechnung des ebenmerklichen Richtungsunterschieds in Abhängigkeit von verschiedenen Kraftbeträgen wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die Richtung systematisch variiert wurde, während der ausgewählte Kraftbetrag jeweils konstant blieb.

Da es in der Literatur widersprüchliche Befunde gibt, ob der ebenmerkliche Richtungsunterschied dem Weberschen Gesetz folgt oder eher konstant bleibt (s. Kap.4.1.1.), wird diese Fragestellung hier explizit behandelt. Daher werden die Werte für den Winkel beim ebenmerklichen Richtungsunterschied sowohl als Prozentwerte als auch in Winkelgrad angegeben.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Hier wurde ebenfalls der oben beschriebene Algorithmus benutzt. Als Standardreize dienen die acht Richtungen in der Horizontalebene (von 0 bis 180°). Die konstant gehaltenen Kraftbeträge wurden in drei Stufen variiert (1.0, 1.5 und 2.0 N). Für 1.5 N wurden erneut als Kontrollbedingung die Richtungen der Frontalebene als zusätzliche Standardreize gewählt. Die Versuchspersonen erhielten wiederum zunächst den Standardreiz, dann wurde der Stylus des PHANTOMS auf die Nullposition zurückgesetzt, anschließend wurde der Vergleichsreiz

dargeboten. Der Kraftbetrag des Vergleichsreizes stimmte dabei immer mit dem des Standardreizes überein, die Richtung des Vergleichsreizes wurde systematisch variiert. Die Differenz zwischen den Winkeln des Standard- und Vergleichsreizes wurde auf ein Maximum von 60% gesetzt. Die Versuchsperson sollte auch hier entscheiden, ob die beiden Reize „gleich“ oder „verschieden“ waren.

Zusätzlich wurde wieder das Interstimulusintervall zwischen Standard- und Vergleichsreiz in den beiden Stufen 0 ms und 500 ms variiert. Der Sichtschutz (ja vs. nein) diente als Gruppierungsfaktor. Die erhobenen Versuchspersonendaten sowie die Darbietung der Reize war dieselbe wie im vorangegangenen Experiment zur Bestimmung des ebenmerklichen Kraftunterschieds.



Methoden

Dasselbe 8 x 3 x 2 x 2 – Design (Winkel x Standardkraftbetrag x Interstimulusintervall x Sichtschutz) wie im ersten Experiment wurde hier verwendet, wobei die abhängige Variable der ebenmerkliche Richtungsunterschied bei Konstanthaltung der Kraft war. Ebenfalls nahm dieselbe Stichprobe an diesem Experiment teil. Die beiden Experimente wurden hintereinander dargeboten, wobei deren Reihenfolge blockweise balanciert wurde.

Ergebnisse

Wie im ersten Experiment wurde der ebenmerkliche Unterschied für die Richtung aus dem Mittelwert der Übergänge der „gleich“- und „verschieden“- Nennungen der Versuchspersonen sowohl als Absolutwerte in Winkelgrad als auch als Prozentwerte berechnet. Insgesamt konnten beim Interstimulusintervall 0 ms von 1440 Paaren 1172 durch „gleich“-Nennungen bei Paaren mit maximaler Differenz bzw. „verschieden“-Nennungen bei gleichen Paaren ausgewertet werden (durchschnittlich 58.60 Paare pro Versuchsperson; Range 43-64; pro Versuchsperson maximal 72 Paare); beim Interstimulusintervall 500 ms waren von insgesamt 1440 Paaren 1216 auswertbar (durchschnittlich 60.80 pro Versuchsperson; Range 55-65; pro Versuchsperson maximal 72 Paare). Die Hinzunahme der Daten für die Orthogonalebene wird im Folgenden explizit angegeben.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Der Gesamtmittelwert des ebenmerklichen Richtungsunterschieds betrug 24% (16°) mit einer Standardabweichung von 5% (4°). Die deskriptiven Werte für die einzelnen Faktoren sind in der Tabelle 4.05 angegeben.

TABELLE 4.05. Deskriptive Werte des ebenmerklichen Richtungsunterschieds in Winkelgrad für die Winkelbeträge und in % für die einzelnen Faktoren .

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert		Standardabweichung		Anzahl (n)
		in °	in %	in °	in %	
Sichtschutz	nein		19		5	10
	ja		18		5	10
Interstimulus-	0 ms		18		6	20

intervall	500 ms		19		4	20
Standardkraft	1.0 N		20		5	20
	1.5 N		18		5	20
	2.0 N		17		5	20
Winkelbetrag	0°	12°	12	1°	1	20
	45°	16°	36	4°	9	20
	90°	23°	26	9°	10	20
	135°	15°	11	5°	4	20
	180°	15°	9	4°	2	20
Ebene	Standard		24		7	20
	orthogonal		25		4	20

Auch hier zeigten sich keine signifikanten Korrelationen mit den erhobenen demographischen Daten, die Ergebnisse sind demnach unabhängig von diesen Daten.

2. Einfluss der Algorithmusfaktoren

In einer einfaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde auch hier für die beiden Interstimulusintervalle getrennt und für die Winkel 0° und 180° bestimmt, ob sich die beiden Gruppen von Versuchspersonen (Faktor „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“) hinsichtlich ihres ebenmerklichen Unterschieds für Richtung in % unterscheiden. Die deskriptiven Werte sind in Tabelle 4.06 dargestellt.

TABELLE 4.06. Deskriptive Werte in % bezüglich der Messwiederholung der Ebenenseite beim ebenmerklichen Richtungsunterschied.

Winkel		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
<i>Interstimulusintervall 0 ms</i>				
0°	zwischen Vpn	12	3	34
	innerhalb Vpn	11	4	49
180°	zwischen Vpn	8	3	34
	innerhalb Vpn	9	4	49
<i>Interstimulusintervall 500 ms</i>				
0°	zwischen Vpn	12	3	29
	innerhalb Vpn	12	3	58
180°	zwischen Vpn	9	3	29
	innerhalb Vpn	9	4	58

Für beide Interstimulusintervalle (ISI) erwies sich der Faktor „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ als nicht signifikant, $F_{\text{ISI}=0\text{ ms}}(1,81) = 0.09$, $\eta^2 = .001$, $p = .765$; $F_{\text{ISI}=500\text{ ms}}(1,85) < 0.00$, $\eta^2 < .000$, $p = .956$. Somit dürfen die Werte der beiden Versuchspersonengruppen zusammengefasst werden.

Um die Effekte der Faktoren „Seite“ und „Stufen“ zu untersuchen, wurde eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung, getrennt für die beiden Interstimulusintervalle und für die Winkel 45°, 90° und 135° bzw. -45°, -90° und -135° mit der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied für Richtung in % berechnet. Die Daten für die Orthogonalebene wurden in dieser Analyse mit berücksichtigt. Die deskriptiven Werte sind in Tabelle 4.07 aufgeführt.

TABELLE 4.07. Deskriptive Werte in % für die Faktoren „Seite“ und „Stufen“ beim ebenmerklichen Richtungsunterschied.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
<i>Interstimulusintervall 0 ms</i>				
Seite	links	27	9	61
	rechts	21	21	53
Stufe	5er-Reihe	19	8	17
	10er-Reihe	24	21	25
	5er- + 10er-Reihe	25	8	72
<i>Interstimulusintervall 500 ms</i>				
Seite	links	26	8	58
	rechts	24	14	62
Stufe	5er-Reihe	23	7	21
	10er-Reihe	26	11	19
	5er- + 10er-Reihe	25	7	80

Wie schon beim ebenmerklichen Kraftunterschied zeigte sich auch bei der Richtungsdiskriminierung für beide Interstimulusintervalle (ISI) weder für den Faktor „Seite“ noch für den Faktor „Stufen“ eine Signifikanz:

$$F_{\text{SEITE, ISI=0 ms}}(1,109) = 1.04, \eta^2 = .009, p = .310;$$

$$F_{\text{STUFEN, ISI=0 ms}}(2,109) = 1.71, \eta^2 = .030, p = .186;$$

$$F_{\text{SEITE, ISI=500 ms}}(1,115) = 0.55, \eta^2 = .005, p = .460;$$

$$F_{\text{STUFEN, ISI=500 ms}}(2,115) = 0.14, \eta^2 = .002, p = .868.$$

Die Gruppen mit den 5er- und 10er-Reihen dürfen auch hier zusammengefasst werden. Ebenfalls bedeutet die fehlende Signifikanz des Faktors „Seite“, dass die Unterschiedsschwelle für Richtung wie auch schon für Kraft symmetrisch ist, diese sich also nicht bezüglich der lateralen Ebene unterscheidet. Für die folgenden Analysen werden die linke und die rechte Seite daher zusammengefasst.

3. Einfluss der unabhängigen Variablen

Eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Interstimulusintervall (0 ms vs. 500 ms), Standardkraftbetrag (1.0 N, 1.5 N, 2.0 N), Standardwinkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135°, 180°) als Messwiederholungsfaktoren und Sichtschutz (ja vs. nein) als Gruppierungsfaktor und der abhängigen Variable ebenmerklicher Richtungsunterschied in % wurde berechnet, um die Effekte der übrigen unabhängigen Variablen auf den ebenmerklichen Unterschied für Richtung zu untersuchen. Da auch hier nur die Haupteffekte interessieren, werden nur diese als Ergebnisse der Varianzanalyse in Tabelle 4.08 dargestellt.

TABELLE 4.08. Ergebnisse der Varianzanalyse.

Quelle	df	F	η^2	<i>p</i>
zwischen Vpn				
Sichtschutz	1	.07	.004	.800
Fehler	18	(655.65)		
innerhalb Vpn				
Interstimulusintervall	1	0.26	.014	.618
Fehler	18	(85.98)		
Standardkraftbetrag	2	12.74*	.414	<.000
Fehler	36	(38.06)		

Winkelbetrag	4	135.32 ^{a*}	.883	<.000
Fehler	72	(305.16)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

^a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant

Der ebenmerkliche Richtungsunterschied zeigte keine signifikante Differenz für den Faktor Sichtschutz, d.h. es war – wie auch schon beim ebenmerklichen Kraftunterschied – unerheblich, ob die Probanden die Bewegungen des PHANTOMs sehen konnten oder nicht.

Im Unterschied zur Kraftdiskriminationsschwelle zeigte sich der ebenmerkliche Richtungsunterschied jedoch unabhängig vom Interstimulusintervall, die Sensitivität der Versuchspersonen wurde also nicht durch diesen Faktor beeinflusst. Die Maskierungseffekte, die bei der Diskrimination von Kraftunterschieden bei einem Interstimulusintervall von 0 ms auftraten, scheinen hier die Unterscheidungsfähigkeit bei Richtungen nicht zu beeinflussen. Dieses Ergebnis ist überraschend und ein Hinweis darauf, dass bei der Richtungswahrnehmung andere perzeptuelle Prozesse beteiligt sind als bei der Kraftwahrnehmung. Möglicher Weise wird das sensorische Gedächtnis, das bei der Kraftwahrnehmung durch das Interstimulusintervall von 0 ms Reaktionen auf die Maskierung zeigte, bei der Richtungswahrnehmung durch ein „Positionsgedächtnis“ direkt in der Skelettmuskulatur erweitert, welches nicht den Maskierungseffekten unterliegt. Dieser Unterpunkt bedarf weiterer Forschung.

Der ebenmerkliche Richtungsunterschied war signifikant verschieden für die drei Kraftbeträge. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test ergab, dass sich der ebenmerkliche Unterschied für Richtung beim Kraftbetrag von 1.0 N signifikant von dem bei den anderen beiden Kraftbeträgen von 1.5 und 2.0 N unterschied ($p = .015$ bzw. $p = .001$), der ebenmerkliche Richtungsunterschied war gleich für die beiden Beträge 1.5 N und 2.0 N ($p = .268$). Auch beim ebenmerklichen Richtungsunterschied scheint es also eine Rolle zu spielen, dass sich der Kraftbetrag von 1.0 N nahe der absoluten Wahrnehmungsschwelle für Kraft befindet.

Der Winkel zeigte auch hier die größte Effektstärke, der Bonferroni-Test ergab, dass sich der ebenmerkliche Unterschied für die Richtung in % für alle Winkel bis auf 0° und 135° unterschied ($p < .000$ bzw. $p = .036$ zwischen 135° und 180°; $p = 1.000$ zwischen 0° und 135°).

Um zu untersuchen, ob der ebenmerkliche Unterschied dem Weberschen Gesetz folgt, wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung für den ebenmerklichen Unterschied in Winkelgrad berechnet. Falls sich der ebenmerkliche Unterschied für die Richtung in Winkelgrad für die einzelnen Winkel nicht unterscheiden sollte, so wäre diese Schwelle konstant und das Webersche Gesetz in diesem Fall ungültig. Da sich bereits herausgestellt hat, dass weder der Sichtschutz noch das Interstimulusintervall den ebenmerklichen Richtungsunterschied beeinflussen, wurden die Werte über diese Faktoren zusammengefasst. Somit wurde eine univariate mehrfaktorielle Varianzanalyse mit der abhängigen Variablen ebenmerklicher Richtungsunterschied in Winkelgrad und den Faktoren Kraftbetrag (1.0, 1.5 und 2.0 N) und Richtung (0°, 45°, 90°, 135°, 180°)

durchgeführt. Neben dem bereits gefundenen Effekt für den Kraftbetrag ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den fünf Winkeln beim ebenmerklichen Richtungsunterschied in Winkelgrad, $F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(4,76) = 29.55$, $\eta^2 = .609$, $p < .000$. Der ebenmerkliche Unterschied für die Richtung ist demnach nicht konstant, sondern kann als Prozentwert durch den Weberbruch dargestellt werden.

Nach der vorherigen Analyse dürfen somit die Prozentwerte für die beiden Winkelbeträge 0° und 135° zusammengefasst werden. Wie beim ebenmerklichen Kraftunterschied zeigt sich eine abnehmende Sensitivität für die lateralen Richtungen im Vergleich zu den sagittalen Richtungen.

Für die Überprüfung der Äquivalenz der Orthogonalebene, die auch hier für den Kraftbetrag von 1.5 N zusätzlich erhoben wurde, wurde eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Interstimulusintervall (0 ms vs. 500 ms), Winkel (45° , 90° , 135°), Ebene (Standard vs. orthogonal) jeweils als Messwiederholungsfaktoren und Sichtschutz (ja vs. nein) als Gruppierungsfaktor durchgeführt.

Neben den oben genannten Effekten ergab sich bei den Ebenen kein signifikanter Unterschied, $F(1, 18) = 1.60$, $\eta^2 = .082$, $p = .222$, es kann also auch beim ebenmerklichen Richtungsunterschied eine Symmetrie in der lateralen und frontalen Ebene angenommen werden.

4. Bestimmung der dreidimensionalen Form des ebenmerklichen Richtungsunterschieds bei Konstanthaltung der Kraft

Aus den vorangegangenen Analysen kann nun durch folgende Rechenschritte die dreidimensionale Form des ebenmerklichen Richtungsunterschieds berechnet werden:

- Angabe des ebenmerklichen Unterschieds als Prozentwert;
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor Sichtschutz;
- Zusammenfassung nach Interstimulusintervall;
- Trennung nach Kraftbetrag (1.0 N vs. 1.5 und 2.0 N);
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Seite“;
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Stufen“;
- Zusammenfassung der Winkel 0° und 135° ;
- Zusammenfassung der Winkel der Standard- und Orthogonalebene;
- dreidimensionale Darstellung durch Rotation um die y-Achse.

Der so berechnete ebenmerkliche Richtungsunterschied wird durch die folgende Abbildung 4.05 veranschaulicht. Die dreidimensionale Form wird durch Rotation um die Ordinate gewonnen.

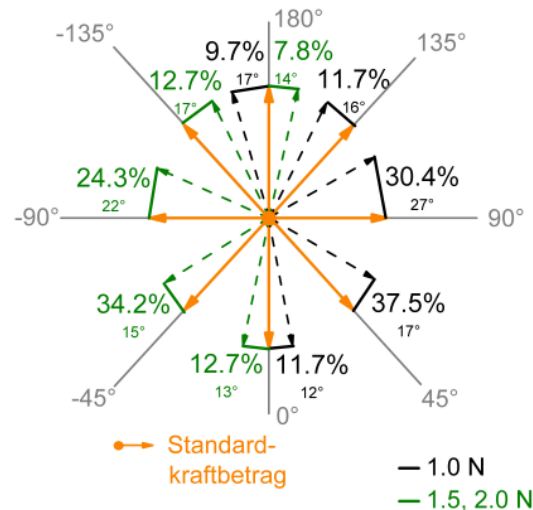


ABBILDUNG 4.05. Zweidimensional dargestellte Unterschiedsschwellen für Richtung bei Konstanthaltung des Kraftbetrags. Die dreidimensionale Darstellung erhält man durch Rotation um die Ordinate.

4.1.5. Quantisierungsart für Kraft

Da sich gezeigt hat, dass der ebenmerkliche Unterschied bei kleinen Kräften erhöht ist, können diese gröber quantisiert werden. Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem der ebenmerkliche Kraftunterschied für kleine Kräfte von 0.5 N, 0.75 N und 1.0 N untersucht wurde. Dabei wurde der Kraftbetrag variiert, die ausgewählte Richtung wurde jeweils konstant gehalten.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Der oben beschriebene Algorithmus wurde für die Prozedur verwendet. Als Standardkraftbeträge wurden 0.5, 0.75 und 1.0 N jeweils in der Horizontalebene gewählt. Für alle drei Beträge wurde zusätzlich die zur Horizontalebene orthogonal stehende Frontalebene erhoben. Zunächst wurde den Probanden der Standardreiz dargeboten, das PHANTOM wurde danach auf die Nullposition zurückgesetzt, dann wurde der Vergleichsreiz dargeboten. Der Vergleichsreiz zeigte immer in dieselbe Richtung wie der Standardreiz.

Die maximale Differenz zwischen Standard- und Vergleichskraftbetrag war 70%. Die Versuchsperson sollte nach jedem dargebotenen Paar entscheiden, ob die beiden Reize „gleich“ oder „verschieden“ waren.



Da hier nur die Relation des ebenmerklichen Unterschieds für kleine Kräfte zu größeren Kräften interessiert, wurde das Interstimulusintervall nicht variiert, dieses wurde auf 500 ms gesetzt.

Am Ende füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM (Rating von keine bis sehr viel in fünf Stufen), Spielen eines Saiteninstrumentes und wenn ja, welches, über welche Zeitdauer und durchschnittliche Übungsstunden pro Monat, enthielt.

Methoden

a) Design

Als abhängige Variable diente der ebenmerkliche Kraftunterschied, der für jeden Winkel einzeln erhoben wurde.

Die unabhängigen Variablen waren die acht Winkel, die drei Standardkraftbeträge (0,5, 0,75 und 1,0 N) und die beiden Ebenen (Standard vs. orthogonal) [8 x 3 x 2 – Design].

Die drei Faktoren, die durch die Anwendung des Standardalgorithmus zustande kamen, nämlich „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ (mit vs. ohne), „Seite“ (rechts vs. links) und „Stufen“ (5er-Reihe, 10er-Reihe vs. beide Reihen), wurden ebenfalls wieder berücksichtigt.

b) Stichprobe

An dem Experiment nahmen 20 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 51 Jahren (mittleres Alter 26,65 Jahre, Standardabweichung 6,47 Jahre) teil. Darunter befanden sich sechs Frauen und 14 Männer. 17 von ihnen waren Rechtshänder, 3 Linkshänder. Bezüglich der Erfahrung mit dem PHANTOM gaben 17 keine oder wenig an, drei gaben an, mittlere bis viel Erfahrung zu haben. Drei von ihnen spielten ein Saiteninstrument mit einer Spieldauer von 0,75, 4 und 2 Jahren.

Ergebnisse

Der ebenmerkliche Kraftunterschied wurde berechnet aus dem Mittelwert der „gleich“ – „verschieden“ – Übergänge als prozentualer Unterschied zum Standardkraftbetrag. Nicht determinierbare Schwellen („gleich“-Nennung bei maximaler Differenz bzw. „verschieden“-Nennung bei gleichem Paar) wurden ausgeschlossen. Von insgesamt 1920 Paaren konnten 1612 ausgewertet werden (durchschnittlich 80,60 Paare pro Versuchsperson; Range 68-90; pro Versuchsperson wurden 96 Paare dargeboten).

Da die Daten der Orthogonalebene vollfaktoriell vorlagen, wurden diese bei jeder Analyse hinzugenommen.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Der Gesamtmittelwert des ebenmerklichen Unterschieds für kleine Kräfte war 37% mit einer Standardabweichung von 11%. Der Gesamtmittelwert war demnach erwartungsgemäß höher als beim Experiment mit den Standardkraftbeträgen 1,0 N, 1,5 N und 2,0 N (hier war der Mittelwert 24%, s.o.). Die deskriptiven Werte für die einzelnen Faktoren werden in Tabelle 4.09 aufgeführt.

TABELLE 4.09. Deskriptive Werte des ebenmerklichen Kraftunterschieds in % für die einzelnen Faktoren.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
Standardkraft	0,5 N	38	11	20
	0,75 N	38	12	20
	1,0 N	34	12	20
Winkelbetrag	0°	41	13	20
	45°	34	11	20

	90°	35	12	20
	135°	34	12	20
	180°	39	12	20
Ebene	Standard	34	12	20
	orthogonal	32	7	20

Interessanter Weise liegt hier die höchste Sensitivität beim ebenmerklichen Kraftunterschied bezüglich des Winkels nicht bei 0° und 180° wie in den Experimenten zum Quantisierungsintervall, sondern bei den lateralen Winkeln 45°, 90° und 135°. Auf diesen Umstand wird in einer nachfolgend durchgeführten Varianzanalyse eingegangen.

Es konnten keine signifikanten Korrelationen zwischen den demographischen Daten und den individuellen Unterschiedsschwellen für Kraft gefunden werden, diese zeigte sich unabhängig von den demographischen Daten.

2. Einfluss der Algorithmusfaktoren

Zunächst wurde für die Winkel 0° und 180° mittels einer einfaktoriellen univariaten Varianzanalyse bestimmt, ob die beiden Gruppen von Versuchspersonen hinsichtlich des Faktors „Messwiederholung der Ebenenseite“ (ohne vs. mit) bezüglich ihres ebenmerklichen Kraftunterschieds verschieden sind. Tabelle 4.10 zeigt die deskriptiven Daten.

TABELLE 4.10. Deskriptive Werte in % bezüglich des Faktors Messwiederholung der Ebenenseite beim ebenmerklichen Kraftunterschied.

Winkel		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	n
0°	zwischen Vpn	41	14	25
	innerhalb Vpn	40	16	69
180°	zwischen Vpn	38	16	25
	innerhalb Vpn	39	16	69

Der Faktor „Messwiederholung bzgl. der Ebenenseite“ erwies sich als nicht signifikant, $F(1, 92) = 0.01$, $\eta^2 < .000$, $p = .940$. Die Werte der beiden Versuchspersonengruppen dürfen somit zusammengefasst werden.

Für die Faktoren „Seite“ und „Stufen“ wurde eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung für die Winkel 45°, 90° und 135° bzw. -45°, -90° und -135° mit der abhängigen Variable ebenmerklicher Kraftunterschied berechnet. Die deskriptiven Werte sind in Tabelle 4.11 aufgeführt.

TABELLE 4.11. Deskriptive Werte in % für die Faktoren „Seite“ und „Stufen“ beim ebenmerklichen Unterschied für Kraft.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	n
Seite	links	35.53	14.66	94
	rechts	30.93	14.36	88
Stufen	5er-Reihe	28.39	12.96	25
	10er-Reihe	36.13	12.96	25

5er- + 10er-Reihe	34.19	12.97	132
-------------------	-------	-------	-----

Es zeigte sich weder für den Faktor „Seite“ noch für den Faktor „Stufen“ eine Signifikanz, $F_{\text{SEITE}}(1,178) = 0.42$, $\eta^2 = .002$, $p = .516$; $F_{\text{STUFEN}}(2,178) = 1.45$, $\eta^2 = .016$, $p = .238$.

Die Gruppen mit den 5er- und 10er-Reihen dürfen also zusammengefasst werden.

Auch hier zeigte sich eine Symmetrie bezüglich der lateralen bzw. frontalen Ebene der Unterschiedsschwelle für Kraft, was durch die Nicht-Signifikanz des Faktors „Seite“ indiziert wird. Für die folgenden Analysen werden die linke und die rechte Seite zusammengefasst.

3. Einfluss der unabhängigen Variablen

Eine zweifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Standardkraft (0.5 N, 0.75 N, 1.0 N) und Winkelbetrag (0° , 45° , 90° , 135° , 180°) jeweils als Messwiederholungsfaktoren und der abhängigen Variable ebenmerklicher Kraftunterschied wurde berechnet, um den Einfluss dieser Faktoren zu untersuchen. Die Haupteffekte als Ergebnis der Varianzanalyse zeigt Tabelle 4.12.

TABELLE 4.12. Ergebnisse der Varianzanalyse.

Quelle	df	F	η^2	p
		innerhalb Vpn		
Standardkraftbetrag	2	3.94*	.172	.028
Fehler	38	(111.76)		
Winkelbetrag	4	5.20 ^{a*}	.215	.007
Fehler	76	(183.20)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

^a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant

Der ebenmerkliche Kraftunterschied war signifikant verschieden für die drei Standardkraftbeträge. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test ergab, dass sich 0.5 N und 0.75 N signifikant von 1.0 N unterschieden ($p = .014$ bzw. $p = .016$), während sich 0.5 N nicht von 0.75 N unterschied ($p = 1.000$). Mit kleinerer Kraft nimmt die Unterschiedsschwelle demnach weiterhin zu.

Der ebenmerkliche Unterschied differierte ebenfalls für den Faktor Winkel, hier bildeten 0° und 180° eine Gruppe ($p = 1.000$), diese unterschied sich von den Winkeln 45° , 90° und 135° ($p = .042$; $p = .049$ bzw. $p = .043$), diese Winkel untereinander unterschieden sich nicht signifikant voneinander ($p = 1.000$; $p = 1.000$ bzw. $p = .059$), wiederum berechnet mittels Bonferroni-Test. Es ist also dasselbe Muster zu erkennen wie im vorangegangenen Experiment zum ebenmerklichen Kraftunterschied, allerdings kehrt sich die Sensitivität um: Während die Probanden im Experiment zum Quantisierungsintervall die höchste Sensitivität für die Kraftdiskriminierung bei 0° und 180° aufwiesen und geringere Sensitivität bei 45° , 90° und 135° , zeigte sich hier der umgekehrte Effekt. Es könnte sich dabei um einen systematischen Effekt handeln, der bei der

Unterschiedsschwelle für kleine Kräfte auftritt. Es ist ebenso denkbar, dass es bei dieser Stichprobe durch die anderen Winkelbeträge 45°, 90° und 135° zu einer Antworttendenz kam, die den ebenmerklichen Unterschied in Richtung der Sensitivität bei den lateralen und frontalen Winkeln verzerrte (response bias, s. z.B. Cattell, 1950). Dies kann nicht abschließend durch dieses Experiment geklärt werden und bedarf weiterer Forschung.

Für die Überprüfung der Äquivalenz der Orthogonalebene, die für alle Standardkraftbeträge zusätzlich erhoben wurde, wurde eine dreifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Standardkraft (0.5 N, 0.75 N und 1.0 N), Winkel (45°, 90°, 135°) und Ebene (Standard vs. orthogonal) jeweils als Messwiederholungsfaktoren und der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied für Kraft durchgeführt.

Neben den oben genannten Effekten für den Winkel ergab sich bei den Ebenen kein signifikanter Unterschied, $F(1,19) = 1.56$, $\eta^2 = .076$, $p = .227$, es kann also wieder eine Symmetrie in der lateralen und in der frontalen Ebene beim ebenmerklichen Kraftunterschied angenommen werden.

4. Bestimmung der dreidimensionalen Form des ebenmerklichen Kraftunterschieds bei kleinen Kräften bei Konstanthaltung der Richtung

Aus den vorangegangenen Analysen kann nun durch folgende Rechenschritte die dreidimensionale Form des ebenmerklichen Kraftunterschieds bei kleinen Kräften berechnet werden:

- Trennung nach Standardkraft (1.0 N vs. 0.5 und 0.75 N);
- Zusammenfassung der Werte für die beiden Seiten;
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Stufen“;
- Zusammenfassung der Winkel 0° und 180°;
- Zusammenfassung der Winkel 45°, 90° und 135° (zusammengefasst aus Standard- und Orthogonalebene);
- dreidimensionale Darstellung durch Rotation um die y-Achse.

Die folgende Graphik 4.06 veranschaulicht den ebenmerklichen Kraftunterschied nach den eben genannten Berechnungsschritten.

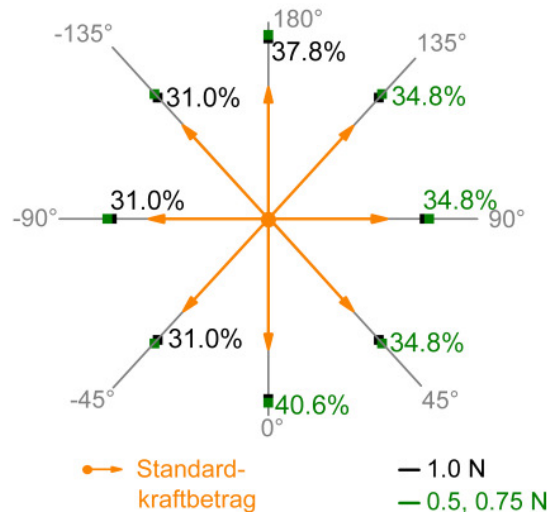


ABBILDUNG 4.06. Zweidimensional dargestellte Unterschiedsschwellen für Kraftbetrag bei kleinen Kräften und konstanter Richtung für das verwendete Interstimulusintervall von 500 ms. Die dreidimensionale Darstellung erhält man durch Rotation um die Ordinate.

5. Vergleich des Kraftbetrags von 1.0 N bei den beiden Experimenten zur Bestimmung des ebenmerklichen Kraftunterschieds

Da sowohl bei dieser Untersuchung als auch bei der Untersuchung des ebenmerklichen Kraftunterschieds für größere Kraftbeträge der Betrag 1.0 N mit dem Interstimulusintervall von 500 ms vorkam, wurden diese beiden Datensätze miteinander verglichen. In einer zweifaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit der abhängigen Variablen ebenmerklicher Kraftunterschied in %, dem Messwiederholungsfaktor Winkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135° und 180°) und dem Gruppierungsfaktor Experimentalgruppe (2 Stufen) wurden die beiden Bedingungen mit dem Kraftbetrag 1.0 N und dem Interstimulusintervall 500 ms miteinander verglichen.

Wieder zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt auf dem Faktor Winkel, $F(4,152) = 9.36$, $\eta^2 = .198$, $p < .000$

Die beiden Experimentalgruppen unterschieden sich in ihren Mittelwerten, die Gruppe mit den größeren Kraftbeträgen hatte einen Mittelwert von 24% (Standardabweichung 9%), die Gruppe mit den kleinen Kraftbeträgen wies einen solchen von 38% (Standardabweichung 9%) auf. Dieser Unterschied erwies sich als signifikant, $F(1,38) = 21.86$, $\eta^2 = .365$, $p < .000$.

Durch die ermittelte signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Experimentalgruppe und Winkel konnte bestätigt werden, dass die Unterschiede bei den beiden Experimentalgruppen vor allem bei den Richtungen 0° und 180° zu finden waren, $F(4,152) = 24.65$, $\eta^2 = .393$, $p < .000$. Bei diesen beiden Winkeln kehrte sich die Sensitivität der Versuchspersonen um (s.o.). Die ebenmerklichen Kraftunterschiede bei den anderen Winkeln waren bei beiden Gruppen fast identisch.

4.1.6. Wahrnehmungsbasierte Kodierung von Kraft- und Richtungsdaten

Bei Telepräsenz Anwendungen mit Krafrückmeldung ist es sowohl bei der Manipulation als auch bei der Exploration üblich, dass sich nicht nur die Kraft oder nur die Richtung ändert. Beide Parameter werden kombiniert zurückgemeldet und können sich unabhängig voneinander verändern.

Nachdem nun die Unterschiedsschwellen für Kraft und Richtung getrennt untersucht wurden, soll hier erörtert werden, wie die Unterschiedsschwellen sich entwickeln, wenn sich sowohl die Kraft- als auch die Richtungsdaten gleichzeitig ändern. Dabei kann durch einen Vergleich mit den Unterschiedsschwellen für jeweils einen Parameter aufgedeckt werden, ob Dominanzeffekte zwischen Kraft- und Richtungswahrnehmung auftreten und welcher der beiden Parameter perzeptuell vorwiegend kodiert wird.

4.1.6.1. Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds bei gleichzeitiger Variation von Kraft und Richtung mittels zweier Vektoren mit einem Interstimulusintervall von 500 ms

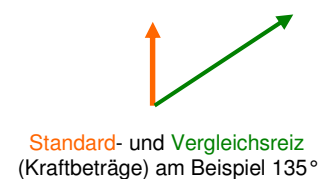
Bei diesem Experiment wurde der Standardkraftbetrag immer konstant gehalten, der Vergleichsreiz wurde sowohl bezüglich des Kraftbetrags als auch bezüglich der Richtung geändert. Die beiden Kraftbeträge wurden immer von einem festen Nullpunkt aus appliziert und das Interstimulusintervall wurde auf 500 ms gesetzt.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Wiederum wurde der beschriebene Algorithmus verwendet. Als Standardreize wurden die Kraftbeträge 1.0, 1.5 und 2.0 N jeweils in der Horizontalebene gewählt. Für 1.5 N wurde zusätzlich die zur Horizontalebene orthogonal stehende Frontalebene gewählt. Den Versuchspersonen wurde zuerst der Standardreiz dargeboten, das PHANTOM wurde dann auf die Nullposition zurückgesetzt, schließlich wurde der Vergleichsreiz präsentiert. Das Interstimulusintervall betrug wie bereits erwähnt 500 ms. Der maximale Unterschied zwischen Standard- und Vergleichskraftbetrag wurde auf 60% gesetzt.

Der Standardreiz wurde immer in Richtung 0° (sagittal zur Versuchsperson hin) vorgegeben. Der Vergleichsreiz zeigte in eine der acht Richtungen und der Kraftbetrag wurde so lange variiert, bis die Unterschiedsschwelle bestimmt wurde. Diese Prozedur wurde für jede der acht Richtungen wiederholt. Die Versuchsperson sollte auch hier entscheiden, ob die beiden Reize „gleich“ oder „verschieden“ waren. Während der Reizdarbietung trugen die Probanden einen Sichtschutz.

Am Ende füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM als fünfstufiges Rating, Spielen eines Saiteninstrumentes und wenn ja, welches, über welche Zeitdauer und durchschnittliche Übungsstunden pro Monat, enthielt.



Methode

a) Design

Als abhängige Variable wurde der ebenmerkliche Unterschied bezüglich der Kraft- und Richtungswahrnehmung für jeden Winkel einzeln erhoben.

Die unabhängigen Variablen waren die acht Winkel und die drei Standardkraftbeträge (1.0, 1.5 und 2.0 N) [8 x 3 – Design].

Als zusätzliche unabhängige Variable diente die Orthogonalebene zur Standardkraft 1.5 N.

Außerdem wurden wiederum die drei Algorithmusfaktoren berücksichtigt: der Faktor „Messwiederholung der Ebenenseite“ (mit vs. ohne), der Faktor „Seite“ (rechts vs. links) und der Faktor „Stufen“ (5er-Reihe vs. 10er-Reihe).

b) Stichprobe

17 Versuchspersonen im Alter von 23 bis 59 Jahren (mittleres Alter 30.94 Jahre, Standardabweichung 9.88 Jahre) nahmen an dem Versuch teil. Darunter befanden sich vier Frauen und 13 Männer. Vier davon waren Linkshänder, 13 waren Rechtshänder. Zwölf Probanden gaben an, keine bzw. wenig Erfahrung mit dem PHANTOM zu haben, fünf hatten mittlere bis sehr viel Erfahrung mit dem PHANTOM. Sechs von ihnen gaben an, ein Saiteninstrument zu spielen bzw. gespielt zu haben mit einer durchschnittlichen Spieldauer von 6.7 Jahren.

Ergebnisse

Wieder wurde der ebenmerkliche Unterschied für die Richtung aus dem Mittelwert der Übergänge der „gleich“- und „verschieden“- Nennungen der Versuchspersonen berechnet. Von insgesamt 1224 Paaren konnten 1039 ausgewertet werden (durchschnittlich 61.12 Paare pro Versuchsperson, Range 54-65; pro Versuchsperson maximal 72 Paare). Die Daten der Orthogonalebene werden in der Analyse nur dann verwendet, wenn dies explizit angegeben wird.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Der Gesamtmittelwert des ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschieds betrug 18%, die Standardabweichung 5%. Die deskriptiven Werte der einzelnen Faktoren sind in Tabelle 4.13 angegeben.

TABELLE 4.13. Deskriptive Werte des ebenmerklichen Unterschieds in % bei gleichzeitiger Variation von Kraft und Richtung mittels Vorgabe zweier Vektoren für die einzelnen Faktoren.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
Standardkraft	1.0 N	20	6	17
	1.5 N	17	5	17
	2.0 N	17	5	17
Winkelbetrag	0°	11	2	17
	45°	25	8	17
	90°	22	8	17
	135°	22	8	17
	180°	10	2	17
Ebene	Standard	22	8	17
	orthogonal	23	7	17

Es konnten keine signifikanten Korrelationen mit den erhobenen demographischen Daten gefunden werden, die Ergebnisse waren also von diesen Daten unabhängig.

2. Einfluss der Algorithmusfaktoren

Mit Hilfe einer einfaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde für die Winkel 0° und 180° untersucht, ob sich die beiden Versuchspersonengruppen im ebenmerklichen Unterschied hinsichtlich des Faktors „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ unterscheiden. Tabelle 4.14 zeigt die deskriptiven Werte.

TABELLE 4.14. Deskriptive Werte in % bezüglich des Faktors Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite für den ebenmerklichen Unterschied.

Winkel		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
0°	zwischen Vpn	10	4	29
	innerhalb Vpn	11	4	41
180°	zwischen Vpn	10	4	29
	innerhalb Vpn	10	4	41

Der Faktor „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ erwies sich als nicht signifikant, $F(1,68) = 0.01$, $\eta^2 < .000$, $p = .929$. Die Werte der beiden Probandengruppen dürfen also zusammengefasst werden.

Zur Untersuchung der Effekte der Faktoren „Seite“ und „Stufen“ wurde eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung für die Winkel 45° , 90° und 135° bzw. -45° , -90° und -135° mit der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied für Kraft und Richtung durchgeführt. Die Daten für die Orthogonalebene wurden in die Analyse einbezogen. In Tabelle 4.15 sind die deskriptiven Daten dargestellt.

TABELLE 4.15. Deskriptive Werte in % für die Faktoren „Seite“ und „Stufen“ für den ebenmerklichen Unterschied.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
Seite	links	22.99	9.05	48
	rechts	23.52	8.94	50
Stufen	5er-Reihe	22.47	8.76	20
	10er-Reihe	21.36	8.76	18
	5er- + 10er-Reihe	24.59	8.76	60

Weder der Haupteffekt auf dem Faktor „Seite“ noch derjenige auf dem Faktor „Stufen“ erwies sich als signifikant, $F_{SEITE}(1,94) < 0.00$, $\eta^2 < .000$, $p = .985$; $F_{STUFEN}(2,94) = 1.12$, $\eta^2 = .023$, $p = .331$.

Die jeweiligen Gruppen wurden somit zusammengefasst. Durch die fehlende Signifikanz für den Seitenunterschied kann auch hier von einer perzeptuellen Symmetrie ausgegangen werden. Die linke und die rechte Seite wurden für die folgenden Analysen zusammengefasst.

3. Einfluss der unabhängigen Variablen

Um die Effekte der experimentellen unabhängigen Variablen auf den ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschied zu untersuchen, wurde eine zweifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Standardkraftbetrag (1.0 N, 1.5 N, 2.0 N) und Standardwinkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135°, 180°) als Messwiederholungsfaktoren und der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied berechnet. Da nur die Haupteffekte hier interessieren, werden wieder nur diese als Ergebnisse der Varianzanalyse in Tabelle 4.16 dargestellt.

TABELLE 4.16. Ergebnisse der Varianzanalyse

Quelle	df	F	η^2	<i>p</i>
		innerhalb Vpn		
Standardkraftbetrag	2	7.98a*	.333	.002
Fehler	32	(30.68)		
Winkelbetrag	4	39.09a*	.710	< .000
Fehler	64	(128.81)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant

Der ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung war signifikant verschieden für die drei Standardkraftbeträge. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test ergab, dass sich der Betrag von 1.0 N signifikant von den anderen beiden Beträgen unterschied ($p = .016$ bzw. $p = .014$), die beiden anderen Beträge (1.5 N und 2.0 N) unterschieden sich hingegen nicht signifikant voneinander ($p = 1.000$). Hier zeigt sich also auch der Hinweis, dass sich der Kraftbetrag von 1.0 N nahe der Wahrnehmungsschwelle befindet.

Der Winkel hatte auch hier die größte Effektstärke. Der Bonferroni-Test ergab, dass sich der ebenmerkliche Unterschied für die Winkel 0° und 180° ($p = 1.000$) sowie für die Winkelbeträge 45°, 90° und 135° ($p = .054$; $p = .685$; $p = 1.000$) nicht unterschied. Diese beiden Winkelgruppen differierten jedoch signifikant voneinander ($p < .000$). Daher dürfen die Werte für die beiden Winkelbeträge 0° und 180° sowie für die Beträge 45°, 90° und 135° zusammengefasst werden.

Zur Überprüfung der Äquivalenz der Orthogonalebene, die ebenfalls für den Standardkraftbetrag von 1.5 N erhoben wurde, wurde eine zweifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Winkel (45°, 90°, 135°) und Ebene (Standard vs. orthogonal) als Messwiederholungsfaktoren und der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied durchgeführt.

Für den ebenmerklichen Unterschied ergab sich bei den beiden Ebenen kein signifikanter Unterschied, $F(1,16) = 0.82$, $\eta^2 = .049$, $p = .378$; auch hier kann eine Symmetrie für den ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschied angenommen werden.

4. Bestimmung der dreidimensionalen Form des ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschieds

Wiederum kann aus den vorhergegangenen Analysen die dreidimensionale Form durch folgende Rechenschritte der ebenmerkliche Kraft- und Richtungsunterschied dargestellt werden:

- Trennung nach Standardkraft (1.0 N vs. 1.5 und 2.0 N);
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Seite“;
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Stufen“;
- Zusammenfassung der Winkel 0° und 180° ;
- Zusammenfassung der Winkelbeträge 45° , 90° und 135° ;
- Zusammenfassung der Winkel der Standard- und Orthogonalebene;
- Dreidimensionale Darstellung durch Rotation um die Ordinate.

Der so berechnete ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung veranschaulicht die folgende Abbildung 4.07.

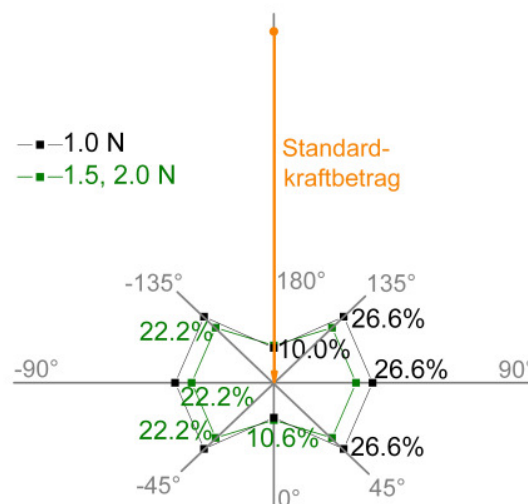


ABBILDUNG 4.07. Zweidimensional dargestellte Unterschiedsschwellen für Kraft und Richtung für das verwendete Interstimulusintervall von 500 ms. Die dreidimensionale Form erhält man durch Rotation um die Ordinate.

5. Perzeptuelle Dominanzeffekte bei Kraft- und Richtungsdaten

Wie schon aus den deskriptiven Daten ersichtlich wurde, sind die Wahrnehmungsschwellen bei der gleichzeitigen Variation von Kraft und Richtung niedriger als bei der Konstanthaltung eines dieser Parameter, die Sensitivität ist höher. Dies spricht dafür, dass sowohl die Kraft als auch die Richtung für die perzeptuelle Enkodierung beider Parameter herangezogen werden. Ein Vergleich der Gesamtmittelwerte der entsprechenden Datensätze für das Interstimulusintervall von 500 ms bestätigt diese Tatsache deskriptiv. Bei dieser Studie betrug der Gesamtmittelwert des ebenmerklichen Unterschieds 18% (Standardabweichung 5%), derjenige des ebenmerklichen

Kraftunterschieds 22% (Standardabweichung 5%) und derjenige des ebenmerklichen Richtungsunterschieds 19% (Standardabweichung 5%).

Wenn der dominante Parameter die Kraft ist, wird erwartet, dass die Verläufe über die drei Experimentalgruppen parallel sind, es sollte keine Interaktion zwischen Kraft und Experimentalgruppe geben.

Wenn die Richtung die dominante perzeptuelle Dimension ist, sollten sich hier ein paralleler Verlauf und ebenfalls keine Wechselwirkung zeigen.

Wenn keiner dieser beiden Parameter eine Rolle spielt und es sich hier um eine distinkte wahrnehmungsbasierte Kodierung bei dieser Form der Reizdarbietung handelt, sollte sich dies in einer bestehenden Dreifachwechselwirkung zwischen Kraft, Richtung und Experimentalgruppe auswirken.

Um diese Dominanzeffekte zu ermitteln, wurde eine dreifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit der abhängigen Variablen ebenmerklicher Unterschied durchgeführt. Als unabhängige Variablen wurden der Kraftbetrag (1.0, 1.5 und 2.0 N) und der Winkelbetrag (0° , 45° , 90° , 135° , 180°) als Messwiederholungsfaktoren und als Gruppierungsfaktor die Experimentalgruppe (ebenmerklicher Unterschied für Kraft und Richtung, ebenmerklicher Kraftunterschied, ebenmerklicher Richtungsunterschied) jeweils für den Datensatz für das Interstimulusintervall von 500 ms eingeführt.

Tabelle 4.17 zeigt die für die Fragestellung relevanten Ergebnisse der Varianzanalyse. Ansonsten wurden die schon bekannten Effekte des Standardkraftbetrags (1.0 N vs. 1.5 und 2.0 N) und der Richtung (0° und 180° vs. 45° , 90° und 135°) als signifikante Haupteffekte bestätigt.

TABELLE 4.17. Ergebnisse der Varianzanalyse. Es werden nur die relevanten Ergebnisse aufgeführt, also der Haupteffekt der Experimentalgruppe und deren Wechselwirkungen.

Quelle	df	F	η^2	p
zwischen Vpn				
Experimentalgruppe	2	3.01	.100	.058
Fehler	54	(343.93)		
innerhalb Vpn				
Kraft x Gruppe	4	0.96	.034	.431
Fehler	108	(47.15)		
Winkelbetrag x Gruppe	8	19.99*	.425	< .000
Fehler	216	(2737.11)		
Kraft x Winkelbetrag x Gruppe	16	1.09	.039	.358
Fehler	432	(27.65)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

*: signifikant

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Wechselwirkung zwischen Richtung und Experimentalgruppe signifikant ist. Der dominante perzeptuelle Parameter scheint also die Kraft zu sein, der Verlauf des ebenmerklichen Unterschieds für Kraft und Richtung gleicht eher dem des ebenmerklichen Kraftunterschieds als dem des ebenmerklichen Richtungsunterschieds. Allerdings scheint die Richtung ebenfalls insofern eine

Auswirkung zu haben, dass die Schwellen geringer sind als beim ebenmerklichen Kraftunterschied. Es werden somit beide Informationen genutzt (was sich auch in der fehlenden Signifikanz des Faktors Experimentalgruppe ausdrückt), wobei jedoch die Kraftwahrnehmung dominiert. Die folgende Abbildung 4.08 veranschaulicht diese Effekte. Es ist zu erkennen, dass der ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung eher dem Verlauf des ebenmerklichen Kraftunterschieds als dem Verlauf des ebenmerklichen Richtungsunterschieds folgt, die Sensitivität jedoch allgemein höher ist.

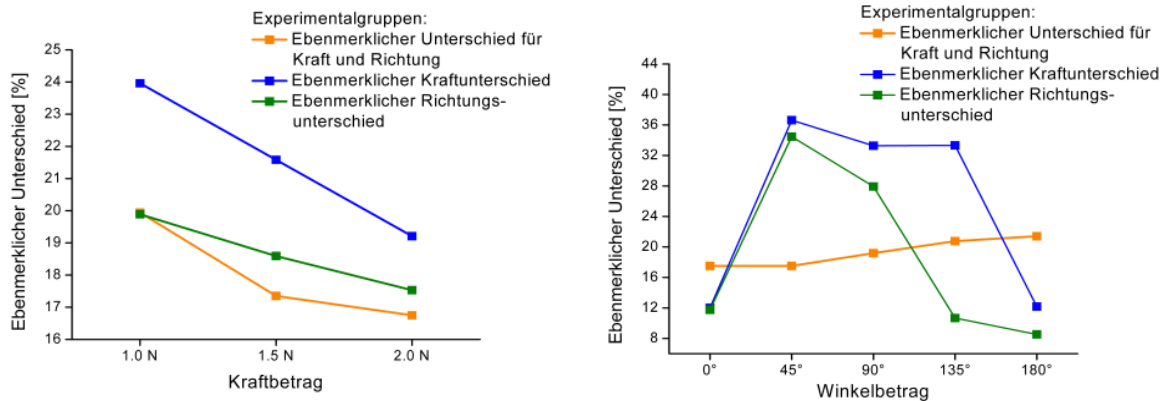


ABBILDUNG 4.08. Veranschaulichung des Verlaufs für den ebenmerklichen Unterschied für Kraft und Richtung im Vergleich zu denjenigen für den ebenmerklichen Kraftunterschied und den ebenmerklichen Richtungsunterschied für die einzelnen Kraftbeträge (links) und die Winkelbeträge (rechts).

4.1.6.2. Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds bei gleichzeitiger Variation von Kraft und Richtung mittels Vektoraddition mit einem Interstimulusintervall von 0 ms

Um den ebenmerklichen Unterschied für Kraft und Richtung ohne Interstimulusintervall zu untersuchen, wurde ein eigenes Experiment mit einer neuartigen Reizdarbietung durchgeführt. Der resultierende Reiz stellt hier eine Vektoraddition von Standard- und Vergleichsreiz dar, das PHANTOM wird also nicht mehr auf die Anfangsposition zurückgesetzt, die Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz wird an das Ende des Standardkraftvektorbetrags gesetzt. Dadurch ändert sich die Antwortoption der Versuchsperson, da dieser subjektiv betrachtet nur ein Kraftbetrag dargeboten wird. Die Probanden sollten nicht mehr beurteilen, ob die beiden Reize „gleich“ oder „verschieden“ waren, sondern ob innerhalb des kontinuierlich dargebotenen Gesamtreizes (zusammengesetzt aus Vektoraddition von Standard- und Vergleichskraftbetrag) eine Änderung stattgefunden hat oder nicht.

Zusätzlich wurde der Frage nachgegangen, ob die Form des ebenmerklichen Unterschieds Hand-Arm-bezogen oder körperachsenbezogen ist. Die in den vorangegangenen Experimenten gefundene Anisotropie (niedrigere Sensitivität für die lateralen Richtungen im Vergleich zu den sagittalen Richtungen bei der haptischen Modalität) repliziert bestehende Befunde aus der Literatur. Wodurch diese Erhöhung der Unterschiedsschwelle für horizontale Bewegungsrichtungen zustande kommt, wird kontrovers diskutiert. Zum einen existiert die Annahme, dass diese anisotrope Form auf Grund der durch neurologische und kognitive Prozesse medierte Hand- und Armphysiologie, v.a. durch die Lokation der Dehnungs- und

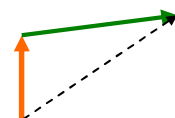
Stellungsrezeptoren in den Gelenken oder durch die Anzahl der angesprochenen taktilen Rezeptoren, zustande kommt (Essock, Krebs & Prather, 1997; Krebs, Essock & Prather, 1991; Anzai, Bearse, Freeman & Cai, 1995; DeValois, Albrecht & Thorell, 1982). Andere Forscher schreiben die Wahrnehmungsasymmetrie der menschlichen Fixierung auf die Körperachse zu, wonach es evolutionsbiologisch und auf Grund von Erfahrung und Übung zu einer Salienz der vertikalen und horizontalen Ausrichtung kommt. Dabei ist haptisch in der vertikalen Richtung eine höhere Genauigkeit erforderlich als in der horizontalen Richtung (Howard, 1973; Mayer, 1983; Palmer & Hemenway, 1978; Royer, 1981; Fisher & Bornstein, 1982; Vogels & Orban, 1987). Um diese beiden Positionen gegeneinander zu testen, wurde neben der Vorgabe des Standardreizes in 0°-Richtung (sagittal auf die Versuchsperson zu) der Standardreiz zusätzlich in 90°-Richtung (horizontal nach rechts) vorgegeben.

Falls die Anisotropie durch die Hand-Arm-Physiologie zustande kommt, sollte sich diese Bedingung von der Bedingung „Vorgabe des Standardreizes in 0°-Richtung“ unterscheiden, die Form des ebenmerklichen Unterschieds sollte um 90° rotiert sein. Falls eine Körperachsensymmetrie vorherrscht, sollten sich die beiden Standardreizbedingungen nicht unterscheiden, die Form des ebenmerklichen Unterschieds sollte dann für beide gleich sein.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Der oben beschriebene Standardalgorithmus wurde verwendet. Als Standardreize wurden die Kraftbeträge 1.0, 1.5, 2.0 und 2.5 N jeweils in der Horizontalebene herangezogen. Für alle Kraftbeträge wurde zusätzlich die zur Horizontalebene orthogonal stehende Frontalebene untersucht.

Den Versuchspersonen wurde der Standardreiz entweder in Richtung 0° oder in Richtung 90° (als Gruppierungsfaktor, d.h. jeweils die Hälfte der Probanden erhielten konsistent eine der beiden Bedingungen; Dauer 1000 ms). Da das Interstimulusintervall auf 0 ms gesetzt wurde, wurde direkt an den Standardreiz die Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz gesetzt. Diese Differenz wies ebenfalls eine Dauer von 1000 ms auf. Die Versuchspersonen sollten beurteilen, ob innerhalb des vorgegebenen Reizes von insgesamt 2000 ms Dauer eine Änderung stattgefunden hat oder nicht. Der maximale Unterschied betrug 80%.



Standard- und Vergleichsreiz
(Kraftbeträge) am Beispiel 135°

Der Fragebogen mit den demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM (fünfstufiges Rating), Spielen eines Saiteninstruments, wenn ja, welches, über welche Zeitdauer und durchschnittliche Übungsstunden pro Monat wurde auch hier von den Probanden im Anschluss an den Versuch ausgefüllt.

Methode

a) Design

Als abhängige Variable wurde der ebenmerkliche Unterschied bezüglich der Kraft- und Richtungswahrnehmung für jeden Winkel einzeln erhoben.

Die unabhängigen Variablen waren die acht Winkel, die vier Standardkraftbeträge (1.0, 1.5, 2.0 und 2.5 N), die beiden Ebenen (Standard vs. orthogonal) jeweils als Messwiederholungsfaktoren und die Vorgabe der Richtung der Standardkraft (0° vs. 90°) als Gruppierungsfaktor [8 x 4 x 2 x 2 – Design].

Außerdem wurden auch hier die drei Algorithmusfaktoren berücksichtigt: der Faktor „Messwiederholung der Ebenenseite“ (mit vs. ohne), der Faktor „Seite“ (rechts vs. links) und der Faktor „Stufen“ (5er-Reihe vs. 10er-Reihe).

b) Stichprobe

20 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 51 Jahren nahmen an dem Versuch teil. Eine weibliche Versuchsperson wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da hier nur die Schwellen für von oben vorgegebene Reizpaare bestimmt werden konnten. Somit verblieben 19 Probanden im Alter von 21 bis 51 Jahren (mittleres Alter 26.84 Jahre, Standardabweichung 6.59 Jahre) in der Stichprobe. Davon waren fünf weiblich und 14 männlich, drei waren Linkshänder und 16 Rechtshänder. 17 hatten keine bzw. wenig Erfahrung mit dem PHANTOM, zwei gaben an, mittlere bis sehr viel Erfahrung zu haben. Zwei spielten ein Saiteninstrument mit einer Spieldauer von 4 bzw. 2 Jahren.

Elf von ihnen erhielten die Bedingung, in der der Standardreiz in 0°-Richtung vorgegeben wurde, die restlichen acht erhielten die Vorgabe in 90°-Richtung. Die beiden Bedingungen wurden über die Versuchspersonen balanciert.

Ergebnisse

Der ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung wurde gebildet als Mittelwert der Übergänge der „keine Änderung“- und „Änderung“- Nennungen der Probanden. Von insgesamt 3040 Paaren konnten 2957 ausgewertet werden (im Durchschnitt 155.63 Paare pro Versuchsperson, Range 126-160; pro Versuchsperson maximal 160 Paare). Da die Daten der Orthogonalebene vollfaktoriell vorlagen, wurden diese in allen Analysen verwendet.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Der Gesamtmittelwert des ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschieds betrug 19% mit einer Standardabweichung von 7%. Die deskriptiven Gesamtwerte sind in Tabelle 4.18 aufgeführt.

TABELLE 4.18. Deskriptive Werte des ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschieds in % für die einzelnen Faktoren

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
Standardkraft	1.0 N	23	7	19
	1.5 N	18	6	19
	2.0 N	17	8	19
	2.5 N	16	8	19
Winkelbetrag	0°	16	8	19
	45°	17	8	19
	90°	21	9	19
	135°	20	9	19
	180°	20	6	19

Ebene	Standard	19	7	19
	orthogonal	18	7	19
Richtung der Standardkraft	0°	17	7	11
	90°	20	7	8

Auch hier konnten keine signifikanten Korrelationen mit den erhobenen demographischen Daten gefunden werden, die Ergebnisse sind also von diesen Daten unabhängig.

2. Symmetrie bei der Vorgabe der 90°-Richtung bei der Standardkraft und Einfluss der Algorithmusfaktoren

Zunächst wurde nur für die Bedingung „Vorgabe des Standardreizes in 0°-Richtung“ und für die Winkel 45°, 90° und 135° bzw. -45°, -90° und -135° untersucht, ob eine horizontale bzw. frontale Symmetrie vorliegt. Eine zweifaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Messwiederholungsfaktor Winkel, dem Gruppierungsfaktor Seite und der abhängigen Variablen ebenmerklicher Unterschied für Kraft und Richtung ergab, dass sich die linke Seite (Mittelwert 15%, Standardabweichung 10%) nicht signifikant von der rechten Seite (Mittelwert 17%, Standardabweichung 10%) unterschied, $F(1,122) = 1.46$, $\eta^2 = .012$, $p = .230$, hier gilt also die Symmetrie bezüglich der horizontalen bzw. frontalen Ebenen wie in den vorangegangenen Experimenten auch.

Für die Vorgabe des Standardreizes in 90°-Richtung wurde dieselbe Analyse durchgeführt. Die linke Seite (Mittelwert 22%, Standardabweichung 8%) unterschied sich nicht signifikant von der rechten Seite (Mittelwert 23%, Standardabweichung 8%), $F(1,90) = 0.46$, $\eta^2 = .005$, $p = .500$.

Bei einer Symmetrie bezüglich der Handachse entsprechen sich die Winkel 45° und 135°, 0° und 180° sowie -45° und -135°. Die Winkel 90° und -90° bilden die Symmetrieachse bei der Vorgabe des Standardreizes in 90°-Richtung. Um die Symmetrie bezüglich dieser Achse zu untersuchen, wurde nochmals dieselbe Analyse mit den angepassten Winkeln berechnet. Hier unterschieden sich die linke Seite (Mittelwert 22%, Standardabweichung 6%) und die rechte Seite (Mittelwert 17%, Standardabweichung 6%) signifikant voneinander, $F(1,62) = 10.77$, $\eta^2 = .148$, $p = .002$.

Durch diese drei Analysen lässt sich aussagen, dass die Symmetrieachse bei der 90° – Vorgabe der Standardkraft dieselbe ist wie bei der Vorgabe in 0°-Richtung. Die Körperachse und nicht die Hand-Arm-Physiologie scheint die Wahrnehmung von Kraft und Richtung zu dominieren.

3. Einfluss der Algorithmusfaktoren

Der Einfluss des Faktors „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ wurde in einer einfaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung für die Winkel 0° und 180° und dem ebenmerklichen Unterschied als abhängige Variable untersucht. Die deskriptiven Werte zeigt Tabelle 4.19.

TABELLE 4.19. Deskriptive Werte in % bezüglich des Faktors Messwiederholung der Ebenenseite für den ebenmerklichen Unterschied.

Winkel		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
0°	zwischen Vpn	16	14	84
	innerhalb Vpn	16	13	130
180°	zwischen Vpn	19	10	84
	innerhalb Vpn	22	14	130

Der Faktor „Messwiederholung bezüglich der Ebenenseite“ erwies sich als nicht signifikant, $F(1,212) = 0.72$, $\eta^2 = .003$, $p = .398$. Die Werte der beiden Probandengruppen dürfen also zusammengefasst werden.

Zur Untersuchung der Effekte der Faktoren „Seite“ und „Stufen“ wurde eine einfaktorielles univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung für die Winkel 45°, 90° und 135° bzw. -45°, -90° und -135° mit der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied für Kraft und Richtung durchgeführt. Tabelle 4.20 zeigt die deskriptiven Daten.

TABELLE 4.20. Deskriptive Werte in % für den ebenmerklichen Unterschied bezüglich der Faktoren „Seite“ und „Stufen“.

Faktor	Faktorstufe	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Anzahl (n)
Seite	links	18	10	119
	rechts	20	11	97
Stufen	5er-Reihe	20	10	31
	10er-Reihe	17	10	53
	5er- + 10er-Reihe	19	10	132

Weder der Faktor „Seite“ noch der Faktor „Stufen“ war signifikant, $F_{SEITE}(1,212) = 0.74$, $\eta^2 = .003$, $p = .392$; $F_{STUFEN}(2,212) = 0.11$, $\eta^2 = .001$, $p = .899$.

Die jeweiligen Gruppen wurden zusammengefasst. Wie schon im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, kann durch die fehlende Signifikanz für den Seitenunterschied auch hier von einer perzeptuellen Symmetrie ausgegangen werden, die linke und die rechte Seite werden für die folgenden Analysen daher bezüglich der Symmetrieachse 0° - 180° zusammengefasst.

4. Einfluss der unabhängigen Variablen

Eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den unabhängigen Variablen Standardkraftbetrag (1.0 N, 1.5 N, 2.0 N, 2.5 N), Standardwinkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135°, 180°), Ebene (Standard vs. orthogonal) als Messwiederholungsfaktoren und Richtung der Standardkraft (0°, 90°) als Gruppierungsfaktor und der abhängigen Variable ebenmerklicher Unterschied für Kraft und Richtung wurde durchgeführt, um den Einfluss der übrigen unabhängigen Variablen auf den ebenmerklichen Unterschied zu untersuchen. Die Haupteffekte als Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 4.21 zu finden.

TABELLE 4.21. Ergebnisse der Varianzanalyse.

Quelle	df	F	η^2	<i>p</i>
		zwischen Vpn		
Richtung der Standardkraft	1	1.16	.064	.296
Fehler	17	(1887.11)		
		innerhalb Vpn		
Standardkraftbetrag	3	38.24 ^{a*}	.692	< .000
Fehler	51	(74.44)		
Winkelbetrag	4	3.21 ^a	.159	.050
Fehler	68	(336.33)		
Ebene	1	1.49	.081	.239
Fehler	17	(235.62)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

^a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant

Der bereits gefunden fehlende Effekt der Vorgabe der Richtung der Standardkraft bezüglich der Symmetrie konnte hier allgemein gefunden werden, der Effekt erwies sich als nicht signifikant. Bei der Wahrnehmung von Kraft und Richtung ist die Referenz also nicht die Hand-Arm-Physiologie, sondern die Körperachse.

Der ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung unterschied sich signifikant für die vier Standardkraftbeträge, hier zeigte sich die höchste Effektstärke. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test ergab, dass sich der Betrag von 1.0 N signifikant von den anderen drei Beträgen unterschied ($p < .000$), die drei anderen Beträge (1.5 N, 2.0 N und 2.5 N) unterschieden sich hingegen nicht signifikant voneinander ($p = .379$; $p = 1.000$ bzw. $p = .273$), was die Ergebnisse der vorangegangenen Experimente repliziert. Ebenso konnte gezeigt werden, dass der ebenmerkliche Unterschied auch für den höheren Kraftbetrag von 2.5 N konstant bleibt.

Der Faktor Winkel war nur knapp nicht signifikant, zusammen mit der geringen Effektstärke und den ähnlichen Zahlenwerten für den ebenmerklichen Unterschied kann hier von einer Isotropie bezüglich des Winkels ausgegangen werden.

Um die Möglichkeit auszuschließen, dass dieser Effekt durch die Hinzunahme der Bedingung „Vorgabe des Standardreizes in 90°-Richtung“ zustande gekommen ist, wurde die Varianzanalyse ohne den Faktor Richtung der Standardkraft und nur für die Bedingung „Vorgabe des Standardreizes in 0°-Richtung“ durchgeführt. Auch bei dieser Teilstichprobe ergaben sich dieselben Effekte, auch der Faktor Winkelbetrag wurde wieder nicht signifikant, $F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(4,40) = 2.41$, $\eta^2 = .194$, $p = .116$. Dieser Effekt kann demnach nicht durch die mögliche Mittelung des ebenmerklichen Unterschieds bei den beiden Richtungsvorgaben erklärt werden.

Die Maskierungseffekte, die auch schon in den vorangegangenen Experimenten für die Reizdarbietung ohne Interstimulusintervall gefunden wurden, scheinen hier so stark zu sein, dass der Winkelleffekt überlagert wird. Jedoch kann hier keine abschließende Erklärung gegeben werden, dazu müsste zu diesem Punkt weitere Forschung betrieben werden.

Als Replikation der früheren Ergebnisse zeigten die beiden Ebenen wieder keinen signifikanten Effekt, auch hier kann von Symmetrie ausgegangen werden.

Insgesamt gesehen hat der ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung bei Vektoraddition und keinem Interstimulusintervall die Form einer Kugel.

5. Bestimmung der dreidimensionalen Form des ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschieds bei Vektoraddition

Aus den vorhergegangenen Analysen kann die dreidimensionale Form des ebenmerklichen Unterschieds für Kraft und Richtung bei Vektoraddition mittels folgender Rechenschritte dargestellt werden:

- Trennung nach Standardkraft (1.0 N vs. 1.5, 2.0 und 2.5 N);
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Seite“;
- Zusammenfassung der Werte für den Faktor „Stufen“;
- Zusammenfassung aller Winkel;
- Zusammenfassung der Winkel für Standard- und Orthogonalebene;
- Zusammenfassung für die Vorgabe der Richtung der Standardkraft;
- dreidimensionale Form durch Rotation um die Ordinate.

Der so berechnete ebenmerkliche Kraft- und Richtungsunterschied bei Vektoraddition wird in der folgenden Abbildung 4.09 dargestellt.

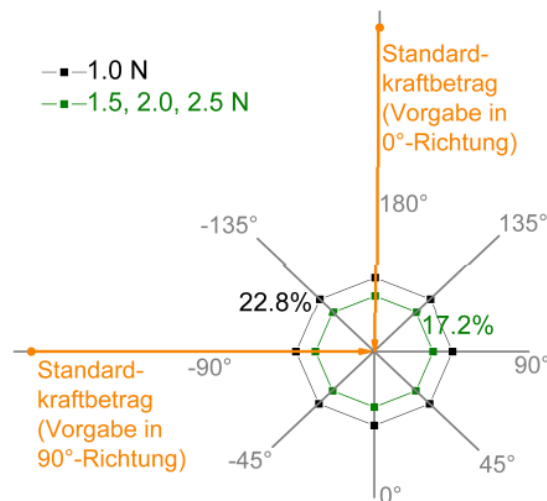


ABBILDUNG 4.09. Zweidimensional dargestellte Unterschiedsschwellen für Kraft und Richtung bei Vektoraddition mit dem verwendeten Interstimulusintervall von 0 ms. Die dreidimensionale Form erhält man durch Rotation um die Ordinate.

6. Vergleich der beiden Experimente zur wahrnehmungsbasierten Kodierung von Kraft- und Richtungsdaten

Mit einer dreifaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung mit der abhängigen Variablen ebenmerklicher Unterschied für Kraft und Richtung und den Messwiederholungsfaktoren Kraftbetrag (1.0, 1.5 und 2.0 N) und Winkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°),

90°, 135°, 180°) und dem Gruppierungsfaktor Kodierungsgruppe (zwei Vektoren mit Interstimulusintervall 500 ms, Gesamtmittelwert 18%, Standardabweichung 6% vs. Vektoraddition mit Interstimulusintervall 0 ms, Gesamtmittelwert 19%, Standardabweichung 6%) wurden diese beiden Gruppen miteinander verglichen. Tabelle 4.22 zeigt die relevanten Ergebnisse dieser Varianzanalyse.

TABELLE 4.22. Ergebnisse der Varianzanalyse.

Quelle	df	F	η^2	p
zwischen Vpn				
Kodierungsgruppe	1	0.40	.012	.530
Fehler	34	(536.29)		
innerhalb Vpn				
Kraft x Kodierungsgruppe	2	4.43*	.115	.015
Fehler	68	(27.02)		
Winkelbetrag x Kodierungsgruppe	4	22.80 ^{a*}	.401	< .000
Fehler	136	(121.55)		
Kraft x Winkelbetrag x Kodierungsgruppe	8	2.77*	.075	.006
Fehler	272	(21.77)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

^a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant

Es zeigte sich, dass sich die beiden Kodierungsgruppen bezüglich ihres Gesamtmittelwerts nicht unterscheiden. Die allgemeine Sensitivität bezüglich Kraft und Richtung änderte sich demnach nicht. Jedoch indizieren die signifikanten Interaktionen der Messwiederholungsfaktoren Kraft und Winkel mit der Kodierungsgruppe, dass sich das grundsätzliche Muster des Verlaufs des ebenmerklichen Unterschieds über diese beiden Gruppen ändert. Die geringere Sensitivität bezüglich der lateralen Ebene und die höhere Sensitivität bei den sagittalen Richtungen bei der Gruppe mit den zwei Vektoren und dem Interstimulusintervall 500 ms ist bei der Gruppe mit der Vektoraddition und dem Interstimulusintervall von 0 ms nicht mehr zu erkennen.

Es scheint sich bei der Vektoraddition um einen anderen Wahrnehmungseffekt zu handeln, also eine unterschiedliche wahrnehmungsbasierte Kodierung, als bei der Applikation von zwei Vektoren.

7. Perzeptuelle Dominanzeffekte bei Kraft- und Richtungsdaten

Für die Untersuchung der perzeptuellen Dominanzeffekte bei Kraft und Richtung wurden die entsprechenden Datensätze für das Interstimulusintervall von 0 ms beim ebenmerklichen Kraftunterschied, ebenmerklichen Richtungsunterschied und beim ebenmerklichen Unterschied für Kraft und Richtung bei Vektoraddition miteinander verglichen. Deskriptiv war hier der Gesamtmittelwert beim ebenmerklichen Kraftunterschied 25% (Standardabweichung 5%), beim ebenmerklichen Richtungsunterschied 19% (Standardabweichung 5%) und beim ebenmerklichen Kraft- und Richtungsunterschied mit Vektoraddition 19% (Standardabweichung 5%).

Die Sensitivität bei diesem Experiment mit Vektoraddition gleicht also eher der beim ebenmerklichen Richtungsunterschied.

Die Verläufe des ebenmerklichen Unterschieds über die drei Experimentalgruppen wurde wieder mit einer dreifaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung mit der abhängigen Variablen ebenmerklicher Unterschied und den Messwiederholungsfaktoren Kraftbetrag (1.0, 1.5 und 2.0 N) und Winkelbetrag (0°, 45°, 90°, 135°, 180°) und dem Gruppierungsfaktor Experimentalgruppe (ebenmerklicher Kraftunterschied, ebenmerklicher Richtungsunterschied, ebenmerklicher Kraft- und Richtungsunterschied bei Vektoraddition) berechnet.

Wiederum wird erwartet, dass sich bei ähnlichen Verläufen und somit bei Dominanz eines Parameters (Kraft oder Richtung) keine Interaktionen mit der Experimentalgruppe zeigen. Wenn keiner dieser beiden Parameter eine Rolle spielt und es sich hier um eine distinkte wahrnehmungsbasierte Kodierung bei dieser Form der Reizdarbietung handelt, sollte sich eine Dreifachwechselwirkung zwischen Kraft, Richtung und Experimentalgruppe ergeben.

Tabelle 4.23 zeigt die für diese Fragestellung relevanten Ergebnisse der Varianzanalyse. Die bereits bekannten Haupteffekte von Kraft und Winkelbetrag konnten auch hier bestätigt werden (nicht in der Tabelle 4.23 aufgeführt).

TABELLE 4.23. Ergebnisse der Varianzanalyse. Es werden nur die relevanten Ergebnisse aufgeführt, also der Haupteffekt der Experimentalgruppe und deren Wechselwirkungen.

Quelle	df	F	η^2	p
zwischen Vpn				
Experimentalgruppe	2	10.26	.268	< .000
Fehler	56	(412.50)		
innerhalb Vpn				
Kraft x Gruppe	4	2.67*	.087	.044
Fehler	112	(53.69)		
Winkelbetrag x Gruppe	8	53.12*	.655	< .000
Fehler	224	(107.99)		
Kraft x Winkelbetrag x Gruppe	16	1.23	.042	.264
Fehler	448	(47.42)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsumme

*: signifikant

Die Werte der drei Experimentalgruppen unterscheiden sich signifikant voneinander. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test ergab, dass sich der ebenmerkliche Unterschied für Kraft und Richtung bei Vektoraddition von dem für Kraft unterschied ($p = .002$), nicht jedoch von dem für Richtung ($p = 1.000$). Wie bereits deskriptiv erkannt, entspricht die Sensitivität bei Kraft und Richtung eher der für Richtung und ist gegenüber der für Kraft erhöht.

Die Wechselwirkungen zwischen Kraft und Experimentalgruppe und zwischen Richtung und Experimentalgruppe sind signifikant. Keiner der beiden Parameter für sich genommen scheint hier einen dominanten Wahrnehmungseffekt zu haben. Die fehlende Signifikanz bei der Dreifachwechselwirkung spricht dafür, dass sowohl Kraft- als auch

Richtungsinformationen integriert werden, die resultierende Wahrnehmungssensitivität im Vergleich mit dem ebenmerklichen Unterschied für Kraft und Richtung bei zwei Vektoren aber nicht überwiegend einem der beiden Faktoren (Kraft oder Richtung) zugeschrieben werden kann. Abbildung 4.10 stellt die hier gefundenen Effekte graphisch dar.

Auch hier konnte bestätigt werden, dass bei dieser Reizvorgabe eine distinkte wahrnehmungsbasierte Kodierung vorherrscht.

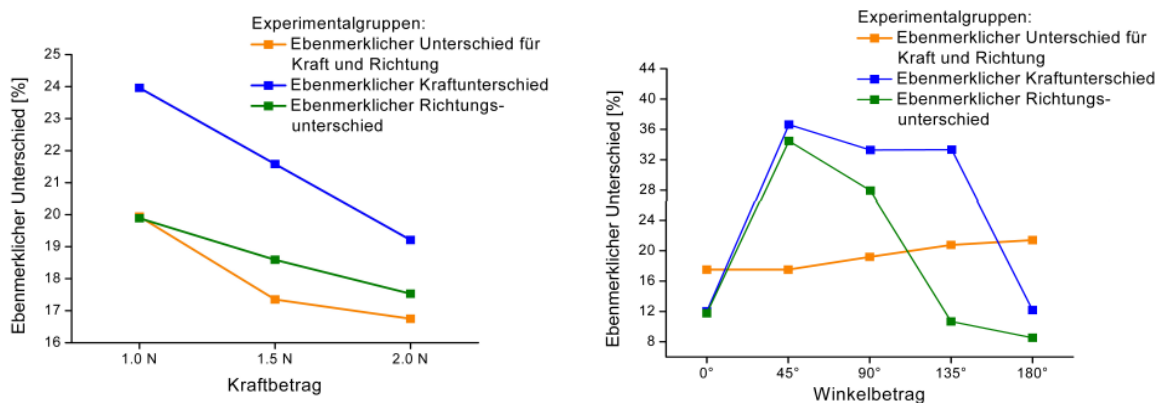


ABBILDUNG 4.10. Veranschaulichung des Verlaufs für den ebenmerklichen Unterschied für Kraft und Richtung bei Vektoraddition im Vergleich zu denjenigen für den ebenmerklichen Kraftunterschied und den ebenmerklichen Richtungsunterschied für die einzelnen Kraftbeträge (links) und die Winkelbeträge (rechts). Es ist zu erkennen, dass es bei keinem dieser beiden Parameter einzeln gesehen zu Dominanzeffekten kommt.

4.1.7. Auswirkung der Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben⁴

Nachdem die Unterschiedsschwellen für Kraft und Richtung unter mehreren Bedingungen in diesem Unterkapitel untersucht wurden und bekannt sind, blieb bisher die Frage offen, wie sich diese Quantisierung auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben auswirkt. Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine Experimentalreihe durchgeführt, bei der auch die visuelle Quantisierung einbezogen wurde. Als Standardaufgabe wurde das Abfahren einer elliptischen Trackingbahn auf einer virtuell haptisch und visuell dargestellten Kugel eingesetzt. Diese Kugel wurde sowohl haptisch als auch visuell quantisiert. Die gefundenen ebenmerklichen Unterschiede wurden dafür zunächst in Bezug auf die Kugeloberfläche berechnet, um die einzusetzenden Quantisierungsintervalle zu bestimmen. In der durchgeführten Experimentalreihe wurde der Abstand zum Bildschirm auf 50 cm festgelegt, die Kugel hatte eine Höhe von 11 cm. Die zu quantisierende Kugel wird für diese Berechnung als Polygon dargestellt, d.h. vereinfacht als Kreis mit x Stützstellen. Dabei ist die Anzahl der Stützstellen x gleich der Quantisierungsstufen und immer ganzzahlig, s. Abbildung 4.11. Die minimale Anzahl an Stützstellen wurde bei der Versuchsreihe auf 12 gesetzt.

⁴ Besonderer Dank geht an Marc-André Schulz, der mich im Rahmen seiner Diplomarbeit tatkräftig bei der Studie unterstützte.

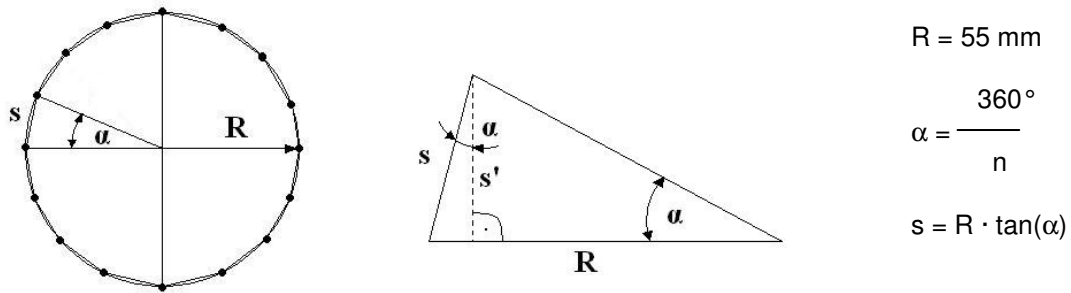


ABBILDUNG 4.11. Quantisierte Kugel, hier als Beispiel mit 16 Stufen.

Die Länge s und der Winkel α variieren bedingt durch die Quantisierungsstufen.

Beispielsweise beträgt die Länge s bei 12 Quantisierungsstufen 31.75 mm und der Winkel α 30° , bei 64 Stufen ist $s = 5.42$ mm und $\alpha = 6^\circ$.

Da jedoch die Kugeloberfläche theoretisch unendlich fein quantisiert werden kann, sollte zunächst festgelegt werden, ab welcher Quantisierung sowohl visuell als auch haptisch die Kugel als solche und nicht mehr als Vieleck wahrgenommen wird, wo also die visuellen und haptischen oberen Grenzen liegen.

4.1.7.1. Visuelles Auflösungsvermögen und obere Grenze für die Erkennung einer Kugel

Für die visuelle Erkennung einer Kugelform spielen verschiedene Wahrnehmungsprinzipien eine Rolle. Die visuelle räumliche Auflösung ist sehr hoch und liegt bei einer Bogenminute, dies entspricht $1/60^\circ$ (Glaser, 1997). Daraus lässt sich das Auflösungsvermögen bei einem Abstand zum Bildschirm von 50 cm berechnen. Die Berechnung wird anhand der Abbildung 4.12 verdeutlicht.

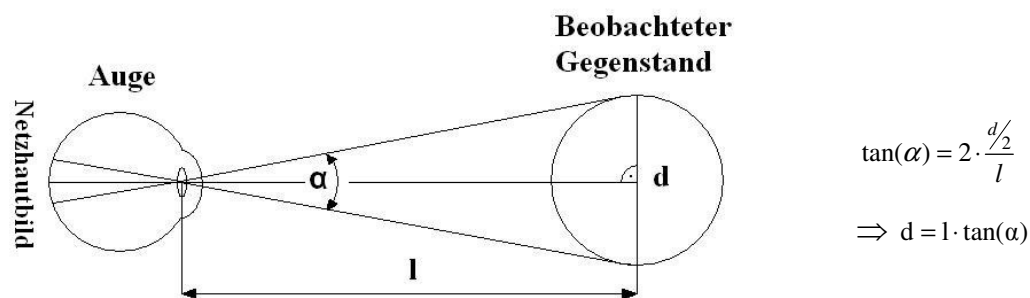


ABBILDUNG 4.12. Sehwinkel und abgeleitete Formeln.

Setzt man den Abstand l von 50 cm und den Winkel $\alpha = 1/60^\circ$ in die Formel für d ein, ergibt sich eine räumliche Auflösung von 0.15 mm, d.h. zwei Punkte im Abstand von 0.15 mm können auf 50 cm Entfernung erkannt werden (normales Sehvermögen vorausgesetzt).

Eine Studie von Hess & Teichgräber (1974) bestätigt diese hohe Schwelle für die visuelle Zweipunktdiskriminierung. Sie boten ihren Versuchspersonen eine 10 cm lange und 0.1 cm

breite Linie im 45°-Winkel auf einem digitalen CRT-Display dar. Der Abstand der Versuchspersonen zum Bildschirm betrug ebenfalls 50 cm. Die Aufgabe war es, diese Linie nachzufahren. Als experimentelle Variation stellten sie die Quantisierungsstufen ein, die Linie erhielt mit zunehmend größerer Quantisierung eine Treppenform. Schon ihre feinste Auflösung von 0.63 mm konnte von den Probanden erkannt werden, diese wirkte sich ebenfalls schon auf die Aufgabenleistung aus, die die Autoren in Form der Fehlerrate erfassten.

Jedoch ist die menschliche Wahrnehmung ganzheitlich, und nach den Gestaltgesetzen als weiteres Wahrnehmungsprinzip wird immer bestrebt, eine „Gestalt“, also eine zusammenhängende Form wahrzunehmen (z.B. Marr, 1982; Wertheimer, 1923; Wandmacher, 1993, S. 329 f.; Goldstein, 1996, S. 170 ff.). Um herauszufinden, wann die quantisierte Kugel als eine Kugel und nicht als Polygon wahrgenommen wird, wurden Screenshots von sechs Quantisierungsstufen (24, 28, 32, 36, 40 und 44) bei der Kugel angefertigt und zwölf Versuchspersonen in zufälliger Reihenfolge im Abstand von 50 cm vorgelegt. Bei den 12 Probanden handelte es sich um vier Frauen und acht Männer zwischen 20 und 27 Jahren (Durchschnittsalter 23.50 Jahre) mit normaler Sicht. Sie sollten intuitiv entscheiden, ob sie auf dem Screenshot eine Kugel oder ein Vieleck sehen. Tabelle 4.24 zeigt die jeweilige Anzahl für die Entscheidung, die vorgelegte Graphik sei eine Kugel bzw. ein Vieleck.

TABELLE 4.24. Häufigkeiten der Entscheidung für eine Kugel bzw. ein Vieleck in Abhängigkeit der Quantisierungsstufen.

Quantisierungsstufen	Anzahl der Entscheidungen für „Vieleck“	Anzahl der Entscheidungen für „Kugel“
24	12	0
28	10	2
32	9	3
36	7	5
40	1	11
44	0	12

Da fast alle Probanden bei der Quantisierungsstufe 40 angaben, eine Kugel zu sehen, wurde diese Stufe als oberste Grenze festgelegt. Die Höhenänderung zur Stufe 36 ist von über der Hälfte der Personen erkennbar.

Betrachtet man die Höhenänderung zwischen den Quantisierungsstufen 36 und 40, so ergeben sich Intervalle zwischen 0.27 und 0.23 mm. Da die menschliche Auflösung 0.15 mm beträgt und die Quantisierungsstufen nur ganzzahlig sein können, wird der ebenmerkliche Unterschied bei der visuellen Quantisierung auf eine Quantisierungsstufe festgelegt.

4.1.7.2. Haptisch obere Grenze für die Erkennung einer Kugel

Für die haptische räumliche Auflösung konnten Johnson & Philipps (1981) experimentell eine taktile Zweipunktschwelle von 0.50 bis 0.87 mm bestimmen. Unter Verwendung der Vereinfachung der Kugel als Polygon lässt sich die spürbare Höhe einer quantisierten Ecke berechnen. Abbildung 4.13 verdeutlicht die zugehörige Berechnung.

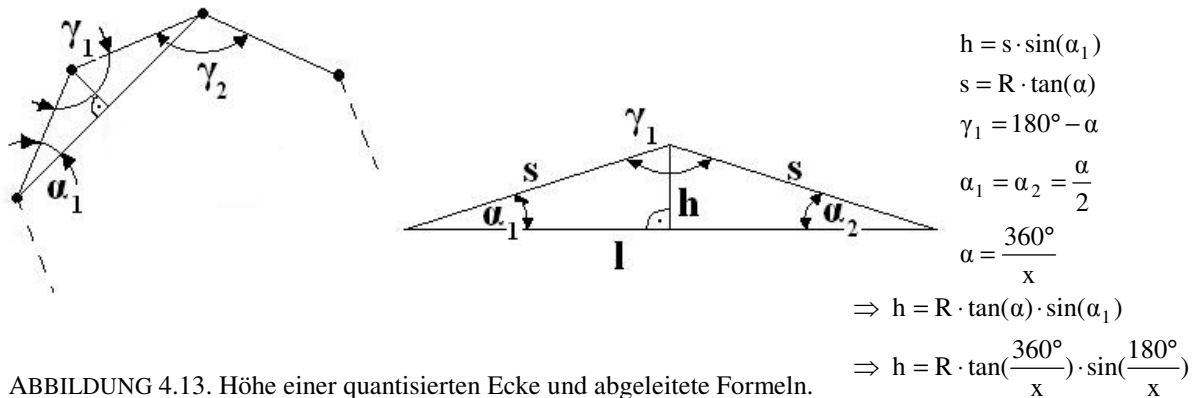


ABBILDUNG 4.13. Höhe einer quantisierten Ecke und abgeleitete Formeln.

Die für diesen Anwendungsfall aufgestellte Gleichung lautet:

$$h_x = 55.00\text{mm} \cdot \tan\left(\frac{360^\circ}{x}\right) \cdot \sin\left(\frac{180^\circ}{x}\right) = 0.50\text{mm} ;$$

h_x wird auf die minimale Zweipunktschwelle von 0.50 mm gesetzt; 55.00 mm ist der Radius R der Kugel, der beim Abtasten ebenso gilt wie bei der visuellen Darstellung, x bezeichnet die Quantisierungsstufen.

Bei der numerischen Iteration dieser Formel ergaben sich folgende reale Lösungen der Gleichung:

$$x_{1/2} = \pm 46.72; x_{3/4} = \pm 1.94; x_{5/6} = \pm 0.67; x_7 = \pm 0.51; x_8 = \pm 0.49; x_9 = \pm 0.40.$$

Betrachtet man die Zahlenwerte, so wird deutlich, dass die Ergebnisse x_3 bis x_9 irrelevant sind, da diese kein Vieleck aufspannen. Das einzige plausible Ergebnis ist x_1 mit 46.72. Da die Quantisierungsstufen ganzzahlig sind, wurde die obere Grenze auf 46 Quantisierungsstufen gesetzt.

Für das haptische Auflösungsvermögen wurden die schon bestehenden Ergebnisse aus diesem Unterkapitel zur Untersuchung des ebenmerklichen Unterschieds und der Kodierung von Kraft- und Richtungsdaten herangezogen. Da beim Abfahren der Ellipse auf der Kugeloberfläche alle Winkel vorkommen, wurde der kleinste gefundene ebenmerkliche Unterschied bei diesen Untersuchungen von 10% für die Berechnungen angenommen.

4.1.7.3. Hauptuntersuchung

Die ursprüngliche Fragestellung bei diesem Abschnitt war, wie sich die Quantisierung haptischer Kraft- und Richtungsdaten unter Berücksichtigung der visuellen Quantisierung auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben auswirkt. Aus den Voruntersuchungen, den Vorbetrachtungen sowie den theoretischen Grundlagen ergeben sich folgende Hypothesen:

- H_{KR1}**: Die Aufgabenleistung nimmt mit gröberer Quantisierung, also mit zunehmend weniger Stufen, ab. Dies gilt sowohl für haptisch als auch für visuell quantisierte Daten.
- H_{KR2}**: Die Aufgabenleistung ist bei sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befindlichen haptischen Quantisierungsstufen gleich, jedoch bei sich außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befindlichen Quantisierungsstufen verschieden.
- H_{KR3}**: Die Hypothese **H_{KR2}** gilt ebenfalls für die visuelle Quantisierung.
- H_{KR4}**: Das Präsenzerleben nimmt mit zunehmend weniger Stufen bei der haptischen und visuellen Quantisierung ab.
- H_{KR5}**: Das Präsenzerleben verändert sich nicht bei zwei haptischen Quantisierungsstufen, die sich um weniger als den ebenmerklichen Unterschied voneinander unterscheiden. Dieses differiert jedoch im Vergleich zu haptischen Quantisierungsstufen, die sich außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befinden.
- H_{KR6}**: Hypothese **H_{KR5}** ist auch für die visuell quantisierte Kugel gültig.
- H_{KR7}**: Die Vorbetrachtungen zur perzeptuellen oberen haptischen und visuellen Grenze sind gültig für die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben, d.h. über den gefundenen Grenzen findet keine Verbesserung der Aufgabenleistung bzw. des Präsenzerlebens mehr statt.
- H_{KR8}**: Bei der gleichzeitigen Quantisierung von haptischen und visuellen Daten treten Dominanzeffekte der visuellen gegenüber der haptischen Modalität auf, d.h. der Abfall der Aufgabenleistung bzw. des Präsenzerlebens gleicht eher demjenigen, der bei der Quantisierung von visuellen Daten aufgetreten ist als demjenigen, der sich bei der Quantisierung der haptischen Daten gezeigt hat.

Beim Abfahren der Ellipse auf der Kugeloberfläche wurde die Aufgabenleistung an Hand der Parameter Genauigkeit, Geschwindigkeit und Kraftaufwand (Halten des Kontaktes mit der Kugeloberfläche) erfasst. Das Präsenzerleben wurde mittels Ratingfragen ermittelt.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen saßen mit dem PHANTOM vor dem Bildschirm. Es wurde sichergestellt, dass der Sichtabstand zum Monitor 50 cm betrug und auch während des Experiments nicht geändert wurde. Ebenso wurde die Handposition der Probanden kontrolliert. Es wurden explizit nur normalsichtige bzw. auf Normalsicht korrigierte Versuchspersonen zugelassen.

Mit dem PHANTOM sollte die Ellipse auf der virtuellen Kugeloberfläche so schnell und genau wie möglich abgefahren werden. Die Versuchspersonen wurden instruiert, möglichst immer den Kontakt zur Kugeloberfläche zu halten. Zunächst hatten die Probanden die Möglichkeit, sich anhand einer Kugel ohne Ellipse an das PHANTOM und die haptische Rückmeldung zu gewöhnen.

Es wurden drei Einzelversuche durchgeführt. Beim ersten Einzelversuch wurde die Kugel nur haptisch quantisiert, visuell wurde die Quantisierung dagegen konstant bei 64 gehalten, was über der oberen Grenze der visuellen Wahrnehmung als Kugel liegt. Beim zweiten Einzelversuch wurde die Kugel nur visuell quantisiert bei Konstanthaltung der haptischen

Quantisierung bei 64 Stufen. Beim dritten Einzelversuch wurden sowohl die haptischen als auch die visuellen Daten synchron quantisiert. Abbildung 4.14 zeigt Beispiele für die visuellen Quantisierungsstufen 64 und 10.

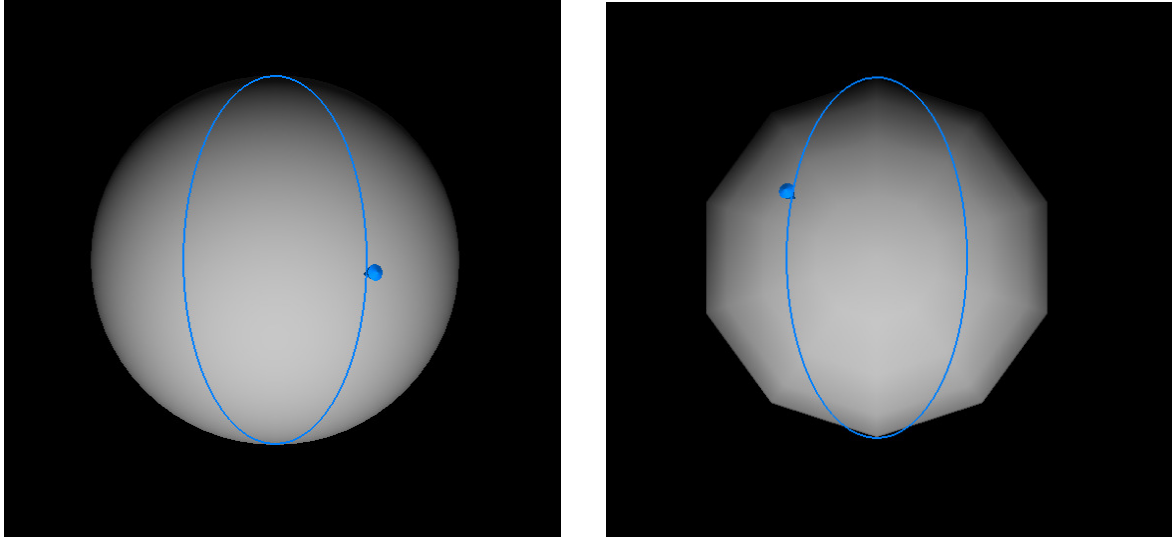


ABBILDUNG 4.14. Beispiele für die visuellen Quantisierungsstufen 64 (links) und 10 (rechts).

Die elliptische Trackingbahn wurde gewählt, damit die Quantisierungsstufen bei der haptischen Rückmeldung spürbar werden. Für die Variation der Quantisierungsstufen wurden für jede Modalität vier Standardstufen gewählt. Eine dieser Standardstufen stellte immer die in den Vorbetrachtungen gefundene obere Grenze für die jeweilige Modalität dar. Ausgehend von diesen Standardstufen wurden Vergleichsstufen in beide Richtungen (kleiner bzw. größer) gewählt, die sich weniger bzw. mehr als der ebenmerkliche Unterschied von der Standardstufe unterschieden. Für die Differenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds wurde jeweils ein halber ebenmerklicher Unterschied ausgesucht (sofern dies möglich war bezüglich der Bedingung, dass die Quantisierungsstufen ganzzahlig sind). Die deutlichen Unterschiede für die Stufen wurden auf zwei ebenmerkliche Unterschiede gesetzt. Für die Quantisierungsstufe der oberen Grenze wurde ein größerer Sprung auf die Stufe 64 gewählt, um die Hypothese H_{KR7} auch mit einem höheren Intervall strenger zu überprüfen. Zweifach vorkommende Stufen innerhalb einer Modalität wurden nicht doppelt erhoben.

Auf Grund der unterschiedlichen Grenzen und des verschiedenen Auflösungsvermögens bei der haptischen und der visuellen Modalität wurden verschiedene Standardstufen für diese beiden Modalitäten ausgewählt. Tabelle 4.25 gibt einen Überblick über die Standard- und Vergleichsstufen.

TABELLE 4.25. Standard- und Vergleichsstufen der Quantisierung für die haptischen und die visuellen Daten.

	$\pm\frac{1}{2}$ ebenmerklicher Unterschied	± 2 ebenmerkliche Unterschiede
Haptische Quantisierungsstufen		
12	10 / 14	- / 20
22	20 / 24	14 / 30
36	34 / 38	28 / 44
46	44 / 48	38 / 64
Visuelle Quantisierungsstufen		
12	11 / 13	- / 16
22	21 / 23	18 / 26
30	29 / 31	26 / 34
40	39 / 41	36 / 64

Beim ersten Einzelversuch (haptisch quantisiert) wurden 15 und beim zweiten Einzelversuch (visuell quantisiert) 18 Stufen realisiert. Für den dritten Einzelversuch wurde die Vereinigungsmenge aus den Stufen des ersten und des zweiten Einzelversuchs gebildet, hier wurden demnach 27 Quantisierungsstufen dargeboten.

Die Probanden durchliefen immer zwei Einzelexperimente, wobei immer der dritte Einzelversuch (haptisch und visuell quantisiert) erhoben wurde. Der erste (haptisch quantisiert) und der zweite (visuell quantisiert) Einzelversuch wurden vollständig über die Versuchspersonen balanciert. Jede Versuchsperson absolvierte also nur eines dieser beiden Experimente, insgesamt 42 bzw. 45 Durchgänge.

Jeder Durchgang dauerte 20 s, in denen die Probanden die Ellipse mit dem Stylus des PHANTOMs abfahren. Dabei sollten sie den Stylus zunächst am unteren Ende der Kugel positionieren und dann mit dem Abfahren beginnen. Es wurde keine Abfahrtrichtung vorgegeben. Bei jedem Durchgang wurden alle 100 ms die Position der Spitze des Stylus des PHANTOMs in x-, y- und z-Richtung in mm, die Abfahrgeschwindigkeit in mm/s sowie die aufgewendete Kraft in N als Aufgabenleistungsmaße aufgezeichnet. Nach jedem Durchgang wurden den Versuchspersonen zur Messung des Präsenzerlebens drei Fragen aus dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) gestellt:

- (1) Wie stark trug das, was Sie gesehen haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark);
- (2) Wie stark trug das, was Sie gefühlt haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark);
- (3) Wie stark fühlten Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark).

Am Ende des Versuchs füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen (auf einer Skala von 1 = keine bis 5 = sehr viel), Grad der Erfahrung mit Computerspielen mit 3D-Graphik (ebenfalls auf einer fünfstufigen Ratingskala) sowie den Teil des Fragebogens von Scheuchenpflug (2001), der die Subskala zur immersiven Tendenz als Persönlichkeitseigenschaft (elf Fragen) enthält.

Methoden

a) Design

Die abhängigen Variablen waren die berechnete Abweichung von der Trackingspur in mm, die Geschwindigkeit in mm/s und die aufgewendete Kraft in N als Aufgabenleistungsmaße. Die drei Präsenzratings stellten die Maße für das Präsenzerleben dar. Unabhängige Variable war die Quantisierung mit den einzelnen Stufen als Messwiederholungsfaktor. Diese Daten wurden für jedes Einzelexperiment gesondert erhoben.

b) Stichprobe

An dem Experiment nahmen 20 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 24 Jahren (Mittelwert 22.60 Jahre, Standardabweichung 0.82 Jahre) teil. Darunter waren vier Frauen und 16 Männer. Alle waren Rechtshänder. 16 gaben an, keine bis mittlere Erfahrung mit virtuellen Umgebungen zu haben, vier hatten viel Erfahrung. Die verbrachten Stunden im Monat mit 3D-Computerspielen bewegten sich zwischen 0 und 85 Stunden mit einer durchschnittlichen Zeit von 15.05 Stunden (Standardabweichung 22.13 Stunden).

Der Gesamtmittelwert der immersiven Tendenz betrug 3.82, Standardabweichung 1.00 (Range der individuellen Mittelwerte 1.00 bis 5.18).

Ergebnisse

Die ersten fünf Sekunden jedes 20 s dauernden Durchgangs wurden nicht ausgewertet, um die Positionierung des Stylus als Messwert auszuschließen.

Die Berechnung der Solltrajektorie ist im Anhang B dargestellt. Die mittlere Abweichung wurde aus der mittleren absoluten Differenz zwischen Ist- und Sollposition (jeweils in Weltkoordinaten) unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit berechnet. Die mittlere Geschwindigkeit sowie die mittlere Kraft wurden als Mittelwerte der Beträge der Vektoren, die jede 100 ms aufgezeichnet wurden, berechnet.

Die Präsenzratings wurden direkt aus den Nennungen der Versuchspersonen ermittelt.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Tabelle 4.26 liefert eine Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen der abhängigen Variablen für die Einzelexperimente.

TABELLE 4.26. Mittelwerte für die abhängigen Variablen bei den drei Einzelexperimenten (Standardabweichungen in Klammern).

Abhängige Variable	Einzelexperiment 1 (Quantisierung haptisch variiert, visuell konstant)	Einzelexperiment 2 (Quantisierung visuell variiert, haptisch konstant)	Einzelexperiment 3 (Quantisierung haptisch und visuell synchron)
Abweichung [mm]	27.72 (1.28)	28.47 (1.48)	28.55 (1.36)
Geschwindigkeit [mm/s]	29.84 (16.14)	35.95 (23.30)	29.64 (15.04)
Kraft [N]	1.37 (0.71)	1.16 (0.40)	1.12 (0.46)
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)	4.85 (1.58)	3.77 (0.94)	3.89 (1.11)

Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	4.07 (1.08)	4.46 (1.03)	4.16 (0.99)
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	3.94 (1.03)	4.39 (0.89)	4.04 (0.98)

Es ist zu erkennen, dass die Mittelwerte aller abhängigen Variablen über die drei Experimente sehr ähnlich sind.

Zwischen den demographischen Daten und den Gesamtmittelwerten der abhängigen Variablen ergaben sich keine signifikanten Korrelationen, die Ergebnisse waren somit unabhängig von den demographischen Daten.

Bezüglich des Zusammenhangs zwischen den Aufgabenleistungsmaßen und den Präsenzratings ergab sich eine signifikante negative Korrelation im mittleren Bereich zwischen Abweichung und dem Präsenzrating 1, $r_{\text{Spearman}} = -.485$, $p = .030$, $n = 20$. Dieser Zusammenhang ist sehr interessant und nicht trivial. Er bedeutet, dass mit abnehmender Aufgabenleistung (höhere Abweichung) das Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzen“) geringer ausfällt. Es könnte sein, dass die Versuchspersonen merkten, dass ihre Leistung schlechter wurde und sich daraufhin das Präsenzerleben verringerte. Dafür spricht auch, dass die anderen beiden Präsenzratings keine signifikanten Korrelationen zu der Abweichung aufwiesen. Jedoch ist auch denkbar, dass Personen, die sich schlechter visuell in die virtuelle Umgebung hineinversetzen konnten, auch eine schlechtere Aufgabenleistung beim Abweichungsmaß zeigten. Die kausale Richtung bzw. die Moderation durch Drittvariablen kann hier nicht abschließend geklärt werden.

Die drei Präsenzratings zeigten hohe positive Korrelationen untereinander, $r_{\text{Spearman}} = .785$, $p < .000$ zwischen Rating 1 und Rating 2; $r_{\text{Spearman}} = .757$, $p < .000$ zwischen Rating 1 und Rating 3 und $r_{\text{Spearman}} = .886$, $p < .000$ zwischen Rating 2 und Rating 3; $n = 20$. Dies ist ein Indiz dafür, dass dasselbe Konstrukt mit diesen drei Fragen gemessen wird.

Die Präsenzratings zeigten jedoch keine Korrelation mit der immersiven Tendenz als Persönlichkeitsvariable, daraus kann gefolgert werden, dass das Rating auf Grund der experimentellen Variation abgegeben wurde und nicht auf Grund der Persönlichkeitseigenschaft.

2. Ergebnisse zum Einzelexperiment haptisch variiert quantisiert unter Konstanthaltung der visuellen Quantisierung bei 64 Stufen

Eine einfaktorielle multivariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den abhängigen Variablen Abweichung, Geschwindigkeit, Kraft, Präsenzrating 1, Präsenzrating 2 und Präsenzrating 3 und dem Messwiederholungsfaktor Quantisierungsstufen wurde durchgeführt, um die Effekte der haptischen Quantisierung bei konstanter und feinauflösender visueller Quantisierung zu ermitteln. Der multivariate Effekt erwies sich als signifikant, $F(84,756) = 1.62$, $\eta^2 = .152$, $p = .001$ (berechnet nach dem Spurkriterium nach Pillai). Tabelle 4.27 zeigt die univariaten Ergebnisse der Varianzanalyse.

TABELLE 4.27. Univariate Ergebnisse der Varianzanalyse bei haptisch variiertem Quantisierung.

Quelle	df	F	η^2	p
	innerhalb Vpn			
Abweichung	14	0.58	.060	.879
Geschwindigkeit	14	0.56	.059	.891
Kraft	14	1.40	.135	.161
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)	14	1.16	.114	.318
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	14	7.23*	.446	< .000
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	14	7.47*	.454	< .000
Fehler	126			

*: signifikant ($\alpha = 5\%$).

Wie aus der Tabelle erkennbar ist, wirkt sich die haptische Quantisierung nur auf das Präsenzerleben und nicht auf die Aufgabenleistung aus. Insbesondere zeigt sich beim Präsenzerleben ein differentieller Effekt. Die Quantisierungsstufen zeigten einen signifikanten Haupteffekt auf dem Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“) und auf dem Präsenzrating 3 („hineinversetzt“). Jedoch konnte kein Effekt auf Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“) gefunden werden.

Da in diesem Einzelexperiment die haptische Rückmeldung variiert wurde und die visuelle Rückmeldung konstant gehalten wurde, erscheint dieses Ergebnis plausibel. Abbildung 4.15 stellt die Ergebnisse für die Präsenzrating 2 und Präsenzrating 3 graphisch dar.

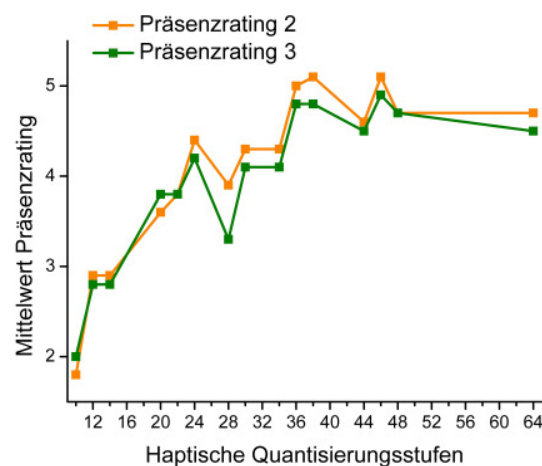


ABBILDUNG 4.15. Entwicklung des Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“) und des Präsenzratings 3 („hineinversetzt“) über die haptischen Quantisierungsstufen.

Es ist erkennbar, dass die beiden Präsenzratings mit zunehmenden haptischen Quantisierungsstufen, also mit feinerer Auflösung, zunehmen. Die Hypothese H_{KR4} ist somit für die haptische Quantisierung bestätigt. Betrachtet man die Ergebnisse des Bonferroni-Tests als post-hoc-Test über die Quantisierungsstufen für beide Präsenzratings,

bilden sich drei Gruppen heraus, die sich voneinander unterscheiden, innerhalb jedoch zum selben Präsenzerleben führen. Die am schlechtesten beurteilte Gruppe stellen die Quantisierungsstufen 10 bis 14 dar. Die Quantisierungsstufen 20 bis 34 wurden ebenfalls gleich bewertet. Die am besten beurteilte Gruppen waren die Quantisierungsstufen 36 bis 64. Tabelle 4.28 gibt die Mittelwerte und Standardabweichung der drei Gruppen für die beiden Präsenzratings wieder.

TABELLE 4.28. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der drei Untergruppen der haptischen Quantisierungsstufen für die beiden signifikanten Präsenzratings.

	Gruppe 1 (Stufen 10 – 14)	Gruppe 2 (Stufen 20 – 34)	Gruppe 3 (Stufen 36 – 64)
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	2.53 (1.04)	4.05 (1.10)	4.79 (1.27)
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	2.53 (1.02)	3.88 (1.05)	4.61 (1.25)

Die fehlende Signifikanz bei den Aufgabenleistungsmaßen zeigt, dass die experimentelle Variation, also die haptischen Quantisierungsstufen, weder einen Einfluss auf die Abweichung, noch auf die Geschwindigkeit, noch auf die Kraftausübung hatten. Dies ist überraschend und entgegen der Erwartung, da die haptischen Stufen durch die Diskretisierung dazu führen sollten, dass die Abweichung erhöht, die Geschwindigkeit verringert und die aufgewendete Kraft erhöht wird. Möglicher Weise ist diese Form der experimentellen Variation nicht dazu geeignet, Effekte auf diese Art der Aufgabenleistungsmaße zu erzielen. Die Hypothese H_{KR1} wird daher für die haptische Quantisierung verworfen. Da sich hier keine signifikanten Effekte ergeben haben, wird die Hypothese H_{KR2} , wonach sich die Aufgabenleistung bei haptischen Quantisierungsstufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds gleich und bei Unterschieden außerhalb der ebenmerklichen Differenz unterschiedlich verhält, bei diesem Einzelexperiment verworfen und nicht gesondert getestet.

Für die Überprüfung der Hypothese H_{KR5} , wonach sich das Präsenzerleben bei innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befindlichen haptischen Quantisierungsstufen identisch, bei Quantisierungsstufen außerhalb des ebenmerklichen Differenz unterschiedlich entwickelt, wurden die vier Standardquantisierungsstufen herangezogen und mit den jeweiligen Vergleichsstufen einzeln verglichen (s. Tab. 4.25). Diese Einzelvergleiche wurden nur für die signifikanten Präsenzratings vorgenommen. Laut Hypothese sollte die Standardstufe nicht von den Vergleichsstufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds differieren, jedoch von denjenigen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds. Nur bei der höchsten Standardstufe sollte dies nicht gelten, da diese die obere Grenze der haptischen Wahrnehmung einer Kugel darstellt. Hier sollte es zu Unterschieden, die oberhalb der Grenze liegen, keine Verbesserung mehr geben (Hypothese H_{KR7}). Mit vier bivariaten einfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung, jeweils den abhängigen Variablen Präsenzrating 1 und Präsenzrating 2 und dem Messwiederholungsfaktor haptische Quantisierungsstufen wurden die erwarteten

Effekte geprüft. Da hier nur die Einzelvergleiche zwischen den innerhalb und außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds gelegenen Quantisierungsstufen interessieren, werden nur diese berichtet (Einzelvergleiche mittels Bonferroni-post-hoc-Test). Tabelle 4.29 liefert die Ergebnisse dieser Einzelvergleiche für die beiden Präsenzratings.

TABELLE 4.29. Ergebnisse der Einzelvergleiche für die Standardstufen bei der haptischen Quantisierung. Nicht erwartete Ergebnisse sind farbig markiert.

Standardstufe	Stufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds	p	Stufen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds	p
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)				
12	12 – 10	.720	12 – 20	1.000
	12 – 14	1.000		
22	22 – 20	1.000	22 – 14	1.000
	22 – 24	1.000	22 – 30	1.000
36	36 – 34	1.000	36 – 28	.484
	36 – 38	1.000	36 – 44	1.000
46	46 – 44	.522	46 – 38	1.000
	46 – 48	1.000	46 – 64	1.000
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)				
12	12 – 10	1.000	12 – 20	.377
	12 – 14	1.000		
22	22 – 20	1.000	22 – 14	.229
	22 – 24	1.000	22 – 30	1.000
36	36 – 34	1.000	36 – 28	.119
	36 – 38	1.000	36 – 44	1.000
46	46 – 44	.368	46 – 38	1.000
	46 – 48	1.000	46 – 64	1.000

Wie aus der Tabelle entnommen werden kann, gilt die Hypothese H_{KR5} nur für unterschiedliche Stufen, deren Unterschiede sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befanden. Bezüglich der Stufen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds konnte kein Abfall des Präsenzerlebens verzeichnet werden. Obwohl diese Unterschiede wahrnehmbar sind, führen sie noch nicht zu einer Beeinträchtigung des Präsenzerlebens, dieses bricht also nicht gleichzeitig mit der Wahrnehmbarkeit einer schlechteren Qualität ein. Dafür sind anscheinend größere Unterschiede notwendig. Die Hypothese H_{KR7} , wonach es über der oberen Schwelle keine Verbesserung mehr gibt, wurde bestätigt.

3. Ergebnisse zum Einzelexperiment visuell variiert quantisiert unter Konstanthaltung der haptischen Quantisierung bei 64 Stufen

Wiederum wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit allen abhängigen Variablen und dem Messwiederholungsfaktor Quantisierungsstufen berechnet, um die Effekte der visuellen Quantisierung bei konstanter und feinauflösender haptischer Quantisierung zu untersuchen. Der multivariate Effekt erwies sich als signifikant, $F(102,918) = 1.84$, $\eta^2 = .170$, $p < .000$ (berechnet nach dem Spurkriterium nach Pillai). Die univariaten Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 4.30 aufgeführt.

TABELLE 4.30. Univariate Ergebnisse der Varianzanalyse bei visuell variiertem Quantisierung.

Quelle	df	F	η^2	p
	innerhalb Vpn			
Abweichung	17	1.38	.133	.156
Geschwindigkeit	17	1.04	.104	.415
Kraft	17	0.63	.065	.867
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)	17	8.05*	.472	< .000
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	17	1.86*	.171	.025
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	17	7.39*	.451	< .000
Fehler	153			

*: signifikant ($\alpha = 5\%$).

Auch bei der visuellen Quantisierung zeigten sich nur Auswirkungen auf das Präsenzerleben, nicht jedoch auf die Aufgabenleistung. Die visuellen Quantisierungsstufen hatten einen Haupteffekt auf allen drei Präsenzfragen. Die Tatsache, dass auch das Präsenzrating 2 („sich durch Spüren hineinversetzen“) von den visuellen Quantisierungsstufen beeinflusst wurde, ist ein erster Hinweis auf die Dominanz der visuellen gegenüber der haptischen Modalität in dieser Experimentalreihe. Die Effektstärke ist jedoch geringer als bei den anderen beiden Präsenzratings, das Sich-hineinversetzen-können durch das, was man gesehen hat und das allgemeine Sich-hineinversetzen-können wurden stärker durch die visuelle Quantisierung beeinflusst. Abbildung 4.16 liefert eine graphische Darstellung der Ergebnisse für die drei Präsenzratings.

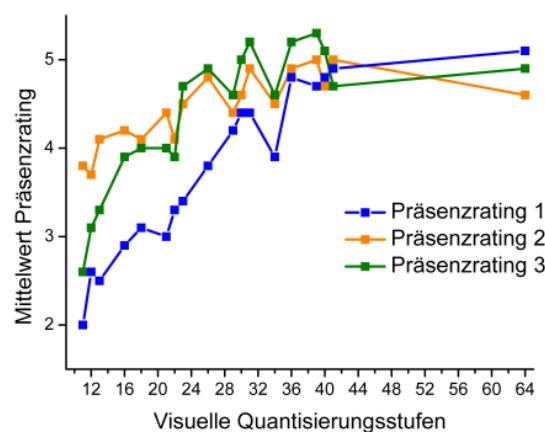


ABBILDUNG 4.16. Entwicklung des Präsenzratings 1 („durch Sehen hineinversetzt“), des Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“) und des Präsenzratings 3 („hineinversetzt“) über die visuellen Quantisierungsstufen.

Auch hier nimmt das Präsenzerleben mit abnehmenden visuellen Quantisierungsstufen, also mit größerer Auflösung ab. Die Hypothese H_{KR4} ist somit auch für die visuelle Quantisierung bestätigt. Mittels Bonferroni-Test als Post-hoc-Test über die drei Präsenzratings wurden wieder drei distinkte Untergruppen ermittelt. Die am schlechtesten

beurteilte Gruppe waren die Quantisierungsstufen 11 bis 13, gefolgt von der zweiten Gruppe mit den Quantisierungsstufen 16 bis 23. Am besten beurteilt wurde die Untergruppe mit den visuellen Quantisierungsstufen 26 bis 64. Im Vergleich zu den haptischen Quantisierungsstufen wird diese Gruppe schon ab einer niedrigeren Stufe besser beurteilt. Möglicher Weise ist der menschliche Wahrnehmungsapparat bestrebt, schon relativ früh eine visuell ganzheitliche Wahrnehmung zu leisten, bei der haptischen Modalität scheint dieser Prozess erst später einzusetzen. Dieser Effekt kann durch dieses Experiment nicht geklärt werden. Tabelle 4.31 stellt die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser drei Gruppen für die drei Präsenzratings dar.

TABELLE 4.31. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der drei Untergruppen der visuellen Quantisierungsstufen für die drei signifikanten Präsenzratings.

	Gruppe 1 (Stufen 11 – 13)	Gruppe 2 (Stufen 16 – 23)	Gruppe 3 (Stufen 26 – 64)
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)	2.37 (1.45)	3.14 (1.06)	4.50 (1.21)
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	3.87 (1.40)	4.26 (1.05)	4.74 (1.07)
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	3.00 (0.87)	4.10 (1.06)	4.95 (1.06)

Bezüglich der Aufgabenleistungsmaße hatte die experimentelle Variation der visuellen Quantisierung weder einen Effekt auf die Abweichung, noch auf die Geschwindigkeit, noch auf die aufgewendete Kraft. Diese Ergebnisse entsprechen denen beim ersten Einzelexperiment mit den haptischen Quantisierungsstufen. Die Hypothesen H_{KR1} und H_{KR3} müssen abgelehnt werden.

Wiederum wurde die Hypothese bezüglich der Unterschiede in den Präsenzempfindensmaßen bei den visuellen Quantisierungsstufen innerhalb und außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds, H_{KR6} , über die Einzelvergleiche zwischen den Standardquantisierungsstufen und den Vergleichsstufen getestet (s. Tab. 4.25). Die Standardstufen sollten sich nicht von den Vergleichsstufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds unterscheiden, jedoch von denjenigen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds. Für Quantisierungsstufen oberhalb der Grenze für die visuelle Wahrnehmung einer Kugel (Quantisierungsstufe 40) sollte es keinen Unterschied im Präsenzerleben geben. Diese Einzelvergleiche wurden mit Hilfe von vier bivariaten einfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung vorgenommen. Die abhängigen Variablen waren die drei Präsenzratings und der Messwiederholungsfaktor die visuelle Quantisierung mit den einzelnen Stufen. Die Einzelvergleiche (ermittelt über Bonferroni-post-hoc-Tests) werden in Tabelle 4.32 dargestellt.

TABELLE 4.32. Ergebnisse der Einzelvergleiche für die Standardstufen bei der visuellen Quantisierung. Nicht erwartete Ergebnisse sind farbig markiert.

Standardstufe	Stufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds	p	Stufen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds	p
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)				
12	12 – 11	.143	12 – 16	1.000
	12 – 13	1.000		
22	22 – 21	1.000	22 – 18	1.000
	22 – 23	1.000	22 – 26	1.000
30	30 – 29	1.000	30 – 26	1.000
	30 – 31	1.000	30 – 34	.957
40	40 – 39	1.000	40 – 36	1.000
	40 – 41	1.000	40 – 64	1.000
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)				
12	12 – 11	1.000	12 – 16	1.000
	12 – 13	1.000		
22	22 – 21	1.000	22 – 18	1.000
	22 – 23	1.000	22 – 26	1.000
30	30 – 29	1.000	30 – 26	1.000
	30 – 31	1.000	30 – 34	1.000
40	40 – 39	1.000	40 – 36	1.000
	40 – 41	1.000	40 – 64	1.000
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)				
12	12 – 11	1.000	12 – 16	1.000
	12 – 13	1.000		
22	22 – 21	1.000	22 – 18	1.000
	22 – 23	.107	22 – 26	.229
30	30 – 29	.368	30 – 26	1.000
	30 – 31	1.000	30 – 34	1.000
40	40 – 39	1.000	40 – 36	1.000
	40 – 41	1.000	40 – 64	1.000

Wie schon im Einzelexperiment mit den haptisch variierenden Quantisierungsstufen zeigt sich auch hier bei den visuell variierenden Quantisierungsstufen, dass sich das Präsenzerleben bei Stufen, deren Unterschiede sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befinden, nicht unterscheidet. Dies gilt jedoch auch für Stufendifferenzen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds. Die Hypothese H_{KR6} wurde somit nur teilweise für Differenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds bestätigt. Hier scheinen ebenfalls größere Unterschiede notwendig zu sein, um das Präsenzerleben zu beeinträchtigen. Die Hypothese H_{KR7} , wonach es über der oberen Schwelle keine Verbesserung mehr gibt, wurde wiederum bestätigt.

4. Ergebnisse zum Einzelexperiment haptisch und visuell synchron quantisiert

Für die Untersuchung der Auswirkungen der haptisch und visuell synchronen Quantisierung wurde eine einfaktorische multivariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit allen abhängigen Variablen und dem Messwiederholungsfaktor Quantisierungsstufen berechnet. Der multivariate Effekt war signifikant, $F(156,2964) = 2.38$, $\eta^2 = .111$, $p < .000$ (berechnet nach dem Spurkriterium nach Pillai). In Tabelle 4.33 sind die univariaten Ergebnisse der Varianzanalyse dargestellt.

TABELLE 4.33. Univariate Ergebnisse der Varianzanalyse bei haptisch und visuell synchron variiertes Quantisierung.

Quelle	df	F	η^2	p
innerhalb Vpn				
Abweichung	26	1.18	.059	.247
Geschwindigkeit	26	0.96	.048	.517
Kraft	26	1.38	.068	.103
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)	26	10.17*	.349	< .000
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	26	7.87*	.293	< .000
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	26	8.93*	.320	< .000
Fehler	494			

*: signifikant ($\alpha = 5\%$).

Auch die haptisch und visuell synchron variierte Quantisierung wirkte sich nur auf das Präsenzerleben, nicht auf die Aufgabenleistung aus. Die Quantisierungsstufen zeigten einen signifikanten Haupteffekt auf allen drei Präsenzratings. Da sowohl die haptische als auch die visuelle Quantisierung variiert wurden, ist es einleuchtend, dass sich Auswirkungen auf alle drei Präsenzratings zeigen. Abbildung 4.17 zeigt die Ergebnisse für diese drei Ratings.

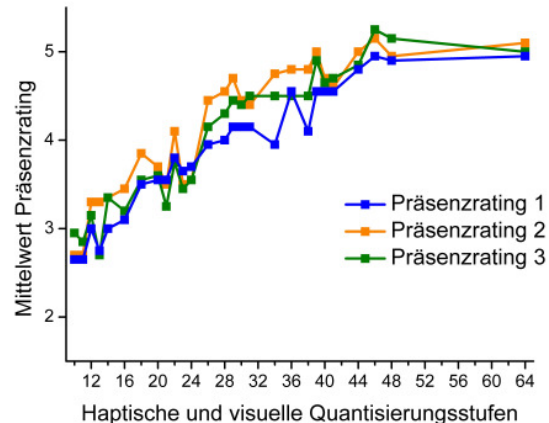


ABBILDUNG 4.17. Entwicklung des Präsenzratings 1 („durch Sehen hineinversetzt“), des Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“) und des Präsenzratings 3 („hineinversetzt“) über die haptisch und visuell synchronen Quantisierungsstufen.

Auch hier nimmt das Präsenzerleben mit abnehmenden Quantisierungsstufen ab, was das Annehmen der Hypothesen H_{KR4} bestätigt. Mittels Bonferroni-Test als Post-hoc-Test über die drei Präsenzratings wurden wieder drei distinkte Untergruppen ermittelt. Die am schlechtesten beurteilte Gruppe waren die Quantisierungsstufen 10 bis 16. Die zweite Untergruppe bestand aus den Quantisierungsstufen 18 bis 34. Am besten beurteilt wurde die Untergruppe mit den Quantisierungsstufen 36 bis 64. Für die beste Beurteilung entsprechen die Quantisierungsstufen denen bei der haptisch variierenden und visuell

konstanten Quantisierung. Der Prozess der ganzheitlichen Wahrnehmung setzt also bei synchroner Variation später ein als bei visueller Variation unter Konstanthaltung der haptischen Quantisierung. Tabelle 4.34 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser drei Gruppen für die drei Präsenzratings.

TABELLE 4.34. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der drei Untergruppen der visuell und haptisch synchronen Quantisierungsstufen für die drei signifikanten Präsenzratings.

	Gruppe 1 (Stufen 10 – 16)	Gruppe 2 (Stufen 18 – 34)	Gruppe 3 (Stufen 36 – 64)
Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“)	2.86 (1.58)	3.84 (1.17)	4.66 (1.23)
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	3.13 (1.52)	4.13 (0.96)	4.90 (1.61)
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	3.03 (1.61)	3.95 (0.97)	4.83 (1.16)

Die haptisch und visuell synchrone Quantisierung zeigte auch wieder keine Effekte auf die Aufgabenleistungsmaße. Die Hypothese H_{KR1} muss also vollständig verworfen werden.

5. Ermittlung von Dominanzeffekten bei der haptischen und visuellen Quantisierung

Da bei allen Einzelexperimenten nur Effekte auf das Präsenzerleben, nicht jedoch auf die Aufgabenleistung gefunden wurden, werden im Folgenden die Dominanzeffekte nur für das Präsenzerleben bestimmt. Als Referenz für die Ermittlung von Dominanzeffekten wurde das dritte Einzelexperiment, bei dem die haptischen und visuellen Daten synchron quantisiert wurden, herangezogen. Im Vergleich zum ersten Einzelexperiment sollte sich zeigen, wie das Präsenzerleben bei haptisch quantisierten und visuell konstant gehaltenen Daten durch die zusätzliche Quantisierung der visuellen Daten beeinflusst wird. Dagegen sollte ein Vergleich mit dem zweiten Einzelexperiment erbringen, wie visuell quantisierte und haptisch konstant gehaltene Daten durch die zusätzliche Quantisierung der haptischen Daten auf das Präsenzerleben wirken.

Da das dritte Einzelexperiment als Vereinigungsmenge der Quantisierungsstufen der beiden anderen Einzelexperimente gebildet wurde, konnten bei beiden Vergleichen (Exp.3 – Exp.1 und Exp. 3 – Exp. 2) alle Quantisierungsstufen herangezogen werden.

Für die Vergleiche wurden jeweils multivariate zweifaktorielle Varianzanalysen berechnet. Als abhängige Variablen dienten die drei Präsenzratings. Die Messwiederholungsfaktoren waren die Experimentalgruppen (reine haptische Quantisierung, Exp. 1 / reine visuelle Quantisierung, Exp.2 vs. haptisch und visuell synchrone Quantisierung, Exp.3) und die jeweils zugehörigen Quantisierungsstufen. Die multivariaten Effekte wurden jeweils nach dem Spurkriterium nach Pillai berechnet.

Beim Vergleich der haptisch variierten Quantisierung mit der haptisch und visuell synchronen Quantisierung erwies sich die Experimentalgruppe als nicht signifikant, $F(3,7) = 1.68$, $\eta^2 = .419$, $p = .256$, die Werte dieser beiden Gruppen unterscheiden sich somit nicht. Die oben genannten Effekte der Quantisierungsstufen zeigten sich auch hier, $F(42,378) = 2.79$, $\eta^2 = .236$, $p < .000$. Es zeigte sich eine signifikante Wechselwirkung

zwischen Experimentalgruppe und Quantisierungsstufen, $F(42,378) = 1.83$, $\eta^2 = .169$, $p = .002$.

Mit Hilfe der univariaten Analyse wurde ermittelt, dass diese Wechselwirkung bei der Präsenzfrage 1 („durch Sehen hineinversetzt“) galt, $F(14,126) = 2.22$, $\eta^2 = .198$, $p = .010$. Bei den anderen beiden Präsenzfragen war diese Interaktion nicht signifikant, $F_{\text{Rating}_2}(14,126) = 1.14$, $\eta^2 = .112$, $p = .330$ bzw. $F_{\text{Rating}_3}(14,126) = 1.26$, $\eta^2 = .123$, $p = .241$. Abbildung 4.18 stellt die Wechselwirkung für die Präsenzfrage 1 graphisch dar.

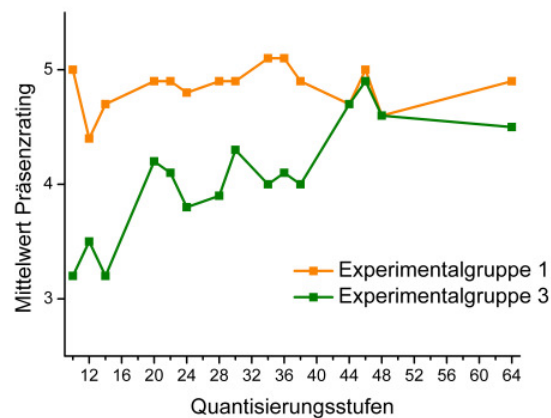


ABBILDUNG 4.18. Wechselwirkung zwischen Experimentalgruppe und Quantisierungsstufen für Präsenzrating 1 („durch Sehen hineinversetzt“) beim Vergleich der haptisch variierten Quantisierung (Experimentalgruppe 1) mit der haptisch und visuell synchronen Quantisierung (Experimentalgruppe 3).

Aus diesem Ergebnis kann abgeleitet werden, dass eine schlechte haptische Darstellung durch eine sehr gute visuelle Darstellung kompensiert werden kann. Das zeigt sich in den höheren Werten vor allem im unteren Quantisierungsbereich bei der Experimentalgruppe 1 mit den haptisch variierten und visuell fein aufgelösten Quantisierungsstufen im Vergleich zur Experimentalgruppe 3 mit haptisch und visuell synchroner Quantisierung.

Beim Vergleich der visuell variierten Quantisierung mit der haptisch und visuell synchronen Quantisierung unterschieden sich diese beiden Experimentalgruppen nicht signifikant voneinander, $F(3,7) = 0.90$, $\eta^2 = .277$, $p = .489$. Die Quantisierungsstufen unterschieden sich voneinander, was die bereits gefundenen Ergebnisse bestätigt, $F(51,459) = 3.77$, $\eta^2 = .295$, $p < .000$. Die multivariate Interaktion zwischen Experimentalgruppe und Quantisierungsstufen erwies sich wieder als signifikant, $F(51,459) = 1.35$, $\eta^2 = .127$, $p = .017$.

Die univariate Analyse ergab, dass diese Interaktion durch die Präsenzfrage 2 („durch Spüren hineinversetzt“) zustande kam, $F(17,153) = 1.99$, $\eta^2 = .181$, $p = .015$. Bei den anderen beiden Präsenzfragen war die Wechselwirkung nicht signifikant, $F_{\text{Rating}_1}(17,153) = 0.19$, $\eta^2 = .021$, $p = 1.000$ bzw. $F_{\text{Rating}_3}(17,153) = 1.19$, $\eta^2 = .117$, $p = .278$. Abbildung 4.19 zeigt die signifikante Wechselwirkung für Präsenzfrage 2.

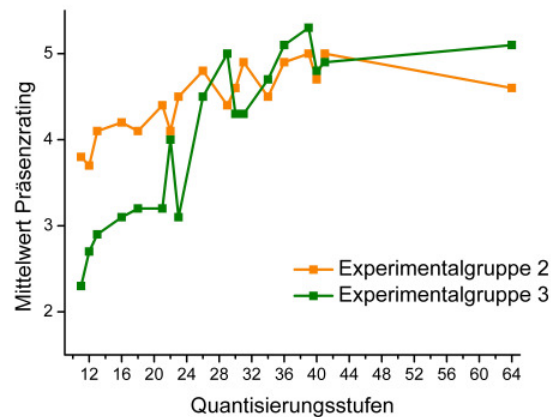


ABBILDUNG 4.19. Wechselwirkung zwischen Experimentalgruppe und Quantisierungsstufen für Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“) beim Vergleich der visuell variierten Quantisierung (Experimentalgruppe 2) mit der haptisch und visuell synchronen Quantisierung (Experimentalgruppe 3).

Auch hier zeigte sich, dass vor allem im groben Quantisierungsbereich eine schlechte visuelle Darstellung durch eine sehr gute haptische Darstellung bezüglich des Präsenzerlebens kompensiert werden kann.

Keine der beiden Modalitäten zeigt hier demnach Dominanzeffekte. Beide können jeweils durch die andere Modalität kompensiert werden, was durch die signifikanten Interaktionen bestätigt wird.

In diesem Unterkapitel zu den Effekten der haptischen und visuellen Quantisierung wurde eine Reihe von Hypothesen aufgestellt, deren Bestätigung sehr unterschiedlich ausgefallen ist. Die folgende Tabelle 4.35 gibt eine Übersicht über die aufgestellten Hypothesen und deren Bestätigung.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei dieser Experimentalreihe keine Effekte der visuellen und haptischen Quantisierung auf die Aufgabenleistung gefunden wurden. Die Quantisierung der visuellen und haptischen Daten zeigte jedoch eine Auswirkung auf das Präsenzerleben, welches mit zunehmend größerer Quantisierung abnahm. Die erforderlichen Unterschiede bei der Quantisierung für eine Erhöhung des Präsenzerlebens liegen dabei über der perzeptuellen Unterschiedsschwelle.

Es gibt sowohl für haptische als auch für visuelle Daten eine obere Grenze der Quantisierungsstufen, ab der keine Verbesserung des Präsenzerlebens mehr stattfindet.

Das Präsenzerleben kann sowohl bei haptisch als auch bei visuell minderqualitativ dargestellten Daten durch eine bessere Darstellung in der jeweils anderen Modalität erhöht werden.

TABELLE 4.35. Übersicht über die aufgestellten Hypothesen zu Effekten der Quantisierung bei Kraft- und Richtungsdaten.

Hypothesen		Erläuterung
H_{KR1} : Mit zunehmend größerer Quantisierung nimmt die Aufgabenleistung ab.	nicht bestätigt	Die Quantisierungsstufen hatten in keinem der drei Einzelexperimente Auswirkungen auf die Aufgabenleistung.
H_{KR2} : Bei haptischer Quantisierung ändert sich die Aufgabenleistung bei Quantisierungsstufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds nicht, variiert jedoch bei deutlich unterscheidbaren Quantisierungsstufen.	nicht bestätigt	
H_{KR3} : Die Hypothese H_{KR2} gilt auch für die Aufgabenleistung bei der visuellen Quantisierung.	nicht bestätigt	
H_{KR4} : Mit zunehmend größerer Quantisierung nimmt das Präsenzerleben ab.	bestätigt	Diese Hypothese konnte bei allen drei Einzelexperimenten bestätigt werden. Bei der haptischen Quantisierung, bei der die visuelle Quantisierung konstant gehalten wurde, zeigte sich ein differentieller Effekt: die Quantisierungsstufen wirkten sich hier auf das allgemeine Präsenzerleben und dasjenige, das auf Grund dessen, was gespürt wurde zustande kam, aus.
H_{KR5} : Bei haptischer Quantisierung ändert sich das Präsenzerleben bei Quantisierungsstufen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds nicht, variiert jedoch bei deutlich unterscheidbaren Quantisierungsstufen.	teilweise bestätigt	Das Präsenzerleben unterschied sich nicht für Quantisierungsstufen, die innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds lagen, jedoch auch nicht für deutlich unterscheidbare Quantisierungsstufen. Um das Präsenzerleben negativ bzw. positiv zu beeinflussen, sind größere Quantisierungsintervalle notwendig.
H_{KR6} : Die Hypothese H_{KR5} gilt auch für das Präsenzerleben bei der visuellen Quantisierung.	teilweise bestätigt	
H_{KR7} : Es findet keine Verbesserung der Aufgabenleistung und des Telepräsenzerlebens oberhalb der in den Vorbetrachtungen gefundenen Grenzen für die haptische und die visuelle Quantisierung.	bestätigt	Oberhalb der gefundenen Grenzen für die haptische und visuelle Quantisierung konnte keine Verbesserung des Präsenzerlebens verzeichnet werden. Da die Aufgabenleistung über die Quantisierungsstufen konstant blieb, gilt dieser Effekt auch hier.
H_{KR8} : Bei der gleichzeitigen Quantisierung von haptischen und visuellen Daten zeigen sich Dominanzeffekte der visuellen auf die haptische Modalität.	teilweise bestätigt	Es konnten für beide Modalitäten Dominanz- und Kompensationseffekte aufgedeckt werden, nicht nur von der visuellen auf die haptische Modalität.

4.1.8. Zusammenfassung und Gestaltungshinweise

In diesem Kapitel zur Wahrnehmung und Einstellung von Kraft- und Richtungsdaten wurde zunächst der ebenmerkliche Unterschied für Kraft bei Konstanthaltung der Richtung untersucht. Es zeigte sich eine Abhängigkeit des ebenmerklichen Kraftunterschieds bezüglich der Standardkraft und der Standardrichtung. Die Unterschiedsschwelle war bei sagittalen Richtungen am geringsten und betrug hier 10%. Der ebenmerkliche Unterschied vergrößerte sich bei den lateralen und schrägen Ebenen auf bis zu 38%. Der haptische „Oblique“-Effekt konnte hier bestätigt werden. Ebenfalls fand eine Erhöhung der Sensitivität bei der Kraft von 1.0 N statt, was dafür spricht, dass sich dieser Kraftbetrag bereits nahe der Absolutschwelle befindet.

Die Sensitivität für sagittale und laterale Richtungen kehrte sich bei kleinen Kräften von 1.0 N und darunter um. Hier war die Sensitivität allgemein geringer zwischen 31 und 41%, jedoch am besten für die lateralen und am schlechtesten für die sagittalen Richtungen.

Für alle realisierten Kraftbeträge (0.5 bis 2.0 N) war der ebenmerkliche Unterschied bei einem Interstimulusintervall von 500 ms geringer als bei einem Intervall von 0 ms. Die in der Literatur bereits berichteten Maskierungseffekte konnten hier somit auch bestätigt werden.

Beim ebenmerklichen Unterschied für Richtung bei Konstanthaltung des Kraftbetrags zeigte sich ebenfalls eine Abhängigkeit bezüglich der Standardrichtung und der Standardkraft. Der ebenmerkliche Richtungsunterschied folgte dabei dem Weberschen Gesetz und konnte als Prozentwert zwischen 10 und 38% angegeben werden. Ebenfalls fand eine Erniedrigung der Sensitivität für laterale Richtungen gegenüber sagittalen Orientierungen statt, jedoch konnten keine Maskierungseffekte gefunden werden, das Interstimulusintervall zeigte keine Auswirkung auf die Sensitivität bei der Richtungsunterscheidung.

Sowohl beim ebenmerklichen Unterschied für Kraft als auch bei dem für Richtung konnten keine visuellen Dominanzeffekte gefunden werden. Die zusätzliche visuelle Rückmeldung hatte keinerlei Einfluss auf die jeweilige Sensitivität.

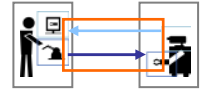
Bei der Erfassung der Unterschiedsschwelle für Kraft und Richtung mittels zweier applizierter Vektoren konnten die Ergebnisse für die Kraftunterscheidung repliziert werden, wobei die Sensitivität allgemein mit Werten zwischen 10 und 27% höher war. Die Kraftwahrnehmung dominierte dabei über die Richtungswahrnehmung.

Bei der Vorgabe von Kraft- und Richtungsdaten mittels Vektoraddition wurde eine Isotropie für alle Richtungen gefunden, hier war der ebenmerkliche Unterschied nur abhängig von der Standardkraft. Bei der Standardkraft von 1.0 N war der ebenmerkliche Unterschied mit 17% gegenüber Kraftbeträgen zwischen 1.5 bis 2.5 N mit 23% erhöht.

Die gefundenen Ergebnisse können bei Telepräsenz- und Teleaktionssystemen direkt je nach Anwendungsfall für die Kompression und darauf folgende Übertragung von haptischen Kraft- und Richtungsdaten genutzt und implementiert werden. Im Unterkapitel 4.3. wird eine Studie zur Kompression, die die gefundenen Schwellen und Ergebnisse nutzt, beschrieben.

Bei der Untersuchung von Effekten der haptischen und visuellen Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten konnten keine Auswirkungen der Quantisierung auf die Aufgabenleistung gefunden werden. Bei gröberen Quantisierungsstufen zeigte sich ein negativer Effekt auf das Präsenzerleben, das sich jedoch robust gegenüber der Wahrnehmungsschwelle zeigte. So wurde ein Einbrechen des Präsenzerlebens erst weit über der Unterschiedsschwelle gefunden. Für die Quantisierung haptischer und visueller Daten wurden obere Schwellen aus der wahrnehmungspsychologischen Grundlagenforschung abgeleitet, über denen keine Verbesserung der Aufgabenleistung und des Präsenzerlebens mehr zu verzeichnen sind. Diese Schwellen wurden bestätigt. Bei der Studie zu den Effekten der haptischen und visuellen Quantisierung zeigte keine der beiden Modalitäten Dominanzeffekte über die jeweils andere Modalität. Es konnte gezeigt werden, dass bezüglich des Präsenzerlebens eine qualitativ schlechte Darstellung in einer Modalität durch eine qualitativ gute Darstellung in der jeweils anderen Modalität kompensiert werden kann.

Wenn bei Telepräsenz Anwendungen eine Modalität nur in schlechter Qualität rückgemeldet werden kann, ist es also möglich, durch eine qualitativ hochwertige Darstellung der anderen Modalität eine Abnahme im Präsenzepfinden zu vermeiden



4.2. Wahrnehmung und Einstellung von vibrotaktilen Daten

Bei Teleaktionssystemen und virtuellen Anwendungen mit haptischer Rückmeldung, bei denen ein direkter taktiler Kontakt stattfindet und notwendig ist, sollten für einen realistischen Eindruck Vibrationen aus der entfernten bzw. virtuellen Umgebung zurückgemeldet werden. Bei Objektkontakt mit harten bzw. steifen Materialien wie beispielsweise Stahl oder Glas treten teilweise sehr hohe Frequenzen bis 1700 Hz auf (Okamura, Dennerlein & Howe, 1998).

Nieder- und hochfrequente Vibrationen werden vom Benutzer vor allem genutzt, um geometrische Materialeigenschaften mittels Bewegung auf der Haut wie Kanten, Texturen, Rauheit, Weichheit bzw. Nachgiebigkeit oder auch Oberflächenvariationen zu erkennen (Seow, 1988; Johnson, 2002; England, 1995; Goldstein, 1996; Kenshalo, 1971; Hollins, 2002; Greenspan & Bolanowski, 1996). Ebenso erscheinen vibrotaktile Stimuli wichtig bei der Greifkraftkontrolle, also beim Ergreifen und Halten eines Gegenstandes bei gleichzeitiger Kompensation von Reibungskräften (Goldstein, 1996; Caldwell, Lawther & Wardle, 1996).

Bei der Applikation von vibrotaktilen Daten bei Explorations- und manipulativen Aufgaben in Telepräsenz- und Teleaktionssystemen sowie in virtuellen Szenarien über ein taktilen Ein-/Ausgabegerät ergeben sich bezüglich der menschlichen Wahrnehmung viele Forschungsfragen. In diesem Abschnitt wird als Schwerpunkt die Wahrnehmung von Frequenzen behandelt.

Da die Vibrationsempfindung in der psychologischen Forschung eine lange Tradition hat, wird zunächst ein Überblick über bereits bestehende Ergebnisse aus der Literatur gegeben, die für diesen Abschnitt relevant sind.

Anschließend wird der Frage nachgegangen, welche Abtastfrequenz bei der Wahrnehmung von Vibrationsfrequenzen notwendig ist. Dabei wird zum einen die obere Schwelle für die Frequenzwahrnehmung betrachtet, zum anderen die Interpretierbarkeit von Vibrationen untersucht.

Das menschliche Auflösungsvermögen für vibrotaktile Stimuli, also der ebenmerkliche Frequenzunterschied für die Einstellung der Quantisierung von Vibrationen, wird nachfolgend betrachtet. Das Quantisierungsintervall für Frequenzen wird mit zwei verschiedenen haptischen Ein-/Ausgabegeräten erfasst, die Quantisierungsart mittels Applikation von niederfrequenten Vibrationen.

Im Anschluss daran wird die Kodierung von Vibrationen, also deren relevante Wahrnehmungsdimensionen, behandelt.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen zur Einstellung des Quantisierungsintervalls werden in ein abschließendes Experiment implementiert, um die Auswirkung dieses Kommunikationsparameters auf die menschliche Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden zu untersuchen.

Als Abschluss erfolgt eine Zusammenfassung und Interpretation der in diesem Kapitel gefundenen Resultate. Daraus werden Gestaltungshinweise für Telepräsenz- und Teleaktionssysteme abgeleitet.

4.2.1. Theoretische Grundlagen

Menschliche Rezeptoren in der Haut vermitteln die taktile Wahrnehmung über mechanische Stimulation bei direktem Kontakt mit externalen Stimuli in der Umgebung. Es gibt vier Hauptrezeptoren in unbehaarter Haut (s. Abb. 4.01.).

Vibrationen werden im niederfrequenten Bereich von den Meissner-Körperchen vermittelt, die nahe der Hautoberfläche lokalisiert sind (Birbaumer & Schmidt, 1996; England, 1995; Greenspan & Bolanowski, 1996). Sie kommen an der Fingerspitze sehr häufig vor mit einer Dichte von 150/cm² (Johnson, 2002). Bei ihrer höchsten temporalen Sensitivität von 20 bis 50 Hz zeigt dieser Rezeptortyp eine räumliche Sensitivität von 2 µm für zeitliche und 6 bis 14 µm für statische Stimulation (Caldwell, Lawther & Wardle, 1996; Johnson, 2002; LaMotte & Srinivasan, 1989).

Im hochfrequenten Bereich mit einer höchsten Sensitivität zwischen 200 und 300 Hz vermitteln die Pacini-Körperchen die Vibrationswahrnehmung (Greenspan & Bolanowski, 1996; Hollins, 2002; Johansson, Landström & Lundström, 1982; Verrillo, Fraioli & Smith, 1969). In diesem Bereich werden Amplituden von 0.01 µm detektiert (Johnson, 2002; LaMotte & Srinivasan, 1989; Verrillo, 1963; Verrillo, Fraioli & Smith, 1969). Sie liegen tiefer in der Hautoberfläche, sind eingekapselt und umgeben von Flüssigkeit (Birbaumer & Schmidt, 1996; England, 1995; Greenspan & Bolanowski, 1996). Sie kommen eher selten an der Fingerspitze vor mit einer Dichte von 10/cm² (Johnson, 2002).

Die räumliche Absolutschwelle für Vibrationen wird in Abbildung 4.20 dargestellt. Dabei zeigt sich eine Frequenzabhängigkeit vor allem im Bereich der Pacini-Körperchen über ca. 60 Hz. Bis ca. 250 Hz nimmt die Detektionsschwelle kontinuierlich bis auf 0.0085 µm ab, danach steigt sie wieder an (z.B. Sherrick & Craig, 1982; Goff, 1967; Hugony, 1935; Mountcastle, LaMotte & Carli, 1972; Rothenberg, Verrillo, Zahorian, Brachman & Bolanowski, 1977; Hollins, 2002; Johnson, 2002; Geldard, 1940; Greenspan & Bolanowski, 1996; Kenshalo, 1971). Die temporale Wahrnehmung von Frequenzen, also die Frequenzunterscheidung und -detektion, stellt den Schwerpunkt dieses Kapitels dar. Die dabei relevanten Aspekte werden nicht an dieser Stelle, sondern jeweils in den betreffenden Unterkapiteln behandelt.

Meissner-Körperchen



Vater-Pacini-Körperchen



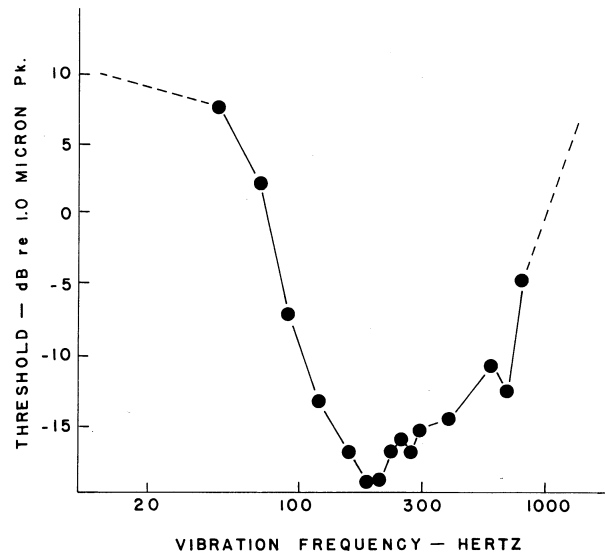


ABBILDUNG 4.20. Räumliche Absolutschwelle von Vibrationen in Abhängigkeit von der Frequenz (aus Sherrick & Craig, 1982, S. 65).

Es wurde eine Reihe von Faktoren gefunden, die die Vibrationswahrnehmung beeinflussen. In den Experimenten in diesem Unterkapitel wurden diese Faktoren berücksichtigt.

Es konnte gezeigt werden, dass es zu vibrotaktilen „Pseudo-Empfindungen“ unter der Wahrnehmungsschwelle kommt, wenn die Probanden die Vibrationen sehen konnten. Es besteht also die Möglichkeit von visuellen Dominanzeffekten bei der haptischen Vibrationswahrnehmung (Welch & Warren, 1986; Klatzky, Lederman & Langseth, 2003; Loomis & Lederman, 1986). Daher wurden in diesem Kapitel die Versuchspersonen bei den Experimenten mit einem Sichtschutz versehen, es sei denn, die Sicht wurde explizit variiert. Weiterhin wurde eine Altersabhängigkeit berichtet, ab einem Alter von 30 Jahren nimmt die Sensitivität für die Vibrationsempfindung ab (Kenshalo, 1986; Goble, Collins & Cholewiak, 1996; Kenshalo, 1971). Deswegen wurden hier nur Probanden im Alter unter 30 Jahren zugelassen. Ebenso beeinflusst die Finger- und Raumtemperatur die Wahrnehmung von Vibrationen (Weitz, 1941; Hollins, 2002; Greenspan & Bolanowski, 1996; Kenshalo, 1971). Auch die Form der Vibrationen (z.B. sinusförmig, rechtecksförmig) beeinflusst deren Wahrnehmung (Rothenberg, Verrillo, Zahorian, Brachman & Bolanowski, 1977; Burdea, 1996). Hier wurden nur sinusförmige Vibrationen untersucht. Bei den Vibrationsexperimenten wurde jeweils die Temperatur konstant gehalten bzw. kontrolliert. Da die Körperregion, -seite und die Kontaktfläche ebenfalls einen Einfluss auf die Vibrationsempfindung ausübt, wurde jeweils dieselbe Kontaktfläche am Zeigefinger der dominanten Hand für die Reizaufnahme benutzt (Sherrick, 1953; Wilska, 1954; Verrillo, 1963; Verrillo, 1966; Craig & Sherrick, 1969). Ebenso zeigt die Kopplungsart zwischen Finger und Vibrationsgerät einen Einfluss auf die Wahrnehmung von Vibrationen (Verrillo, 1962; Goble, Collins & Cholewiak, 1996; Lamoré & Keemink, 1988). Dieser Umstand wurde in diesem Unterkapitel explizit variiert, die Ergebnisse verschiedener Kopplungsarten und Ein-/Ausgabegeräte wurden dann miteinander verglichen.

Die Stimulusdauer bewirkt ebenfalls eine Änderung in der Empfindung von Vibrationen, diese wurde hier konstant gehalten (Verrillo, 1965; Checkosky & Bolanowski, 1994; Verrillo & Smith, 1976; Loomis & Lederman, 1986). Das Interstimulusintervall betrug bei allen Experimenten, bei denen verschiedene Vibrationen miteinander verglichen werden sollten, 500 ms. Das menschliche sensorische Ultrakurzzeitgedächtnis für haptische Daten hat eine Spanne von 600 bis 800 ms, nach diesem Zeitraum verfällt die Information (Bliss, Crane, Mansfield & Townsend, 1966; Berglund, Berglund & Ekman, 1967; Sinclair & Burton, 1996). Daher wurde jeweils ein geringeres Interstimulusintervall gewählt.

4.2.2. Standardapparaturen

Die untersuchten Vibrationen wurden mittels zwei Standardapparaturen vorgegeben, die beide näher beschrieben werden.

1. Aufbau mit Vibrationsgenerator

Sinusförmige vibrotaktile Stimuli wurden appliziert über einen Vibrationsgenerator (Minishaker Type 4810, Brüel & Kjaer, Dänemark), der auf einer massiven Holzplatte befestigt wurde. Frequenz, Amplitude und Beschleunigung der Stimulusvibrationen wurden kontrolliert über einen Frequenzgenerator (Sweep/Function Generator, Model 180, Wavetek, Deutschland) und einen Leistungsverstärker (Power Amplifier Type 2706, Brüel & Kjaer, Dänemark). Kontrolliert wurden die Vibrationen über einen Beschleunigungsnehmer (Accelerometer Type 4371, Brüel & Kjaer, Dänemark), einen Ladungsverstärker (Charge Amplifier Type 2635, Brüel & Kjaer, Dänemark) und ein digitales Oszilloskop (54600A Oscilloscope, 100 MHz, 2 Channel (digital), Hewlett Packard, Deutschland).

Bei zeitbeschränkter Vorgabe der Stimulusvibrationen wurden diese über einen selbstgebaute elektronischen Zeitschalter gesandt.

Die Ausgaben des Frequenzgenerators, des Beschleunigungsnehmers und des Ladungsverstärkers wurden über das Oszilloskop angezeigt. Diese Anzeigen wurden in μm - und Frequenzwerte umgerechnet. Abbildung 4.21 zeigt eine schematische Darstellung der Ein- und Ausgabeseite für den Versuchsaufbau.

Der Beschleunigungsnehmer mit einer runden Kontaktfläche (13.5 mm Durchmesser; 143 mm²) wurde direkt auf den Vibrationsgenerator geschraubt, mit Schaumgummi (Durchmesser 14 mm; 154 mm²) beklebt und direkt als Kontaktfläche für den Finger der Versuchspersonen genutzt. Der Vibrationsgenerator mit dem Beschleunigungsnehmer wurde in ein kleines Holzhaus eingebettet, und die Kontaktfläche wurde durch ein Loch in dem Holzhaus mit 15 mm Durchmesser gesteckt. Durch die Lücke von 0.5 mm zwischen Kontaktfläche und Holzhaus wurde die Ausbreitung der Vibrationen über den Finger und das Holz eingedämmt (s. auch Verrillo, 1963). Die Vibrationen wurden mit diesem Aufbau also immer senkrecht zur Fingeroberfläche appliziert. Ein Vorhang wurde vor dem Holzhaus angebracht, um zu verhindern, dass die Probanden die Vibrationen visuell erfassen können und um damit sicherzustellen, dass nur die haptische Modalität bewertet wird. Zusätzlich wurden Aufstützmöglichkeiten für den Arm und die Hand aus Schaumstoff an die Holzplatte angebracht. Da die Vibrationen über den

Vibrationsgenerator auch hörbar sind, wurde den Versuchspersonen Rauschen über geschlossene Kopfhörer gegeben. Abbildung 4.22 zeigt den vollständigen Versuchsaufbau mit dem Vibrationsgenerator⁵.

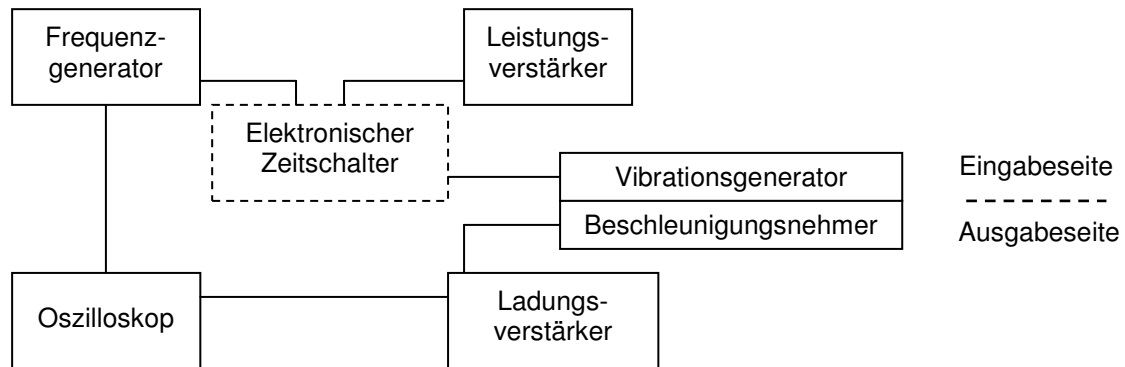


ABBILDUNG 4.21. Schematische Darstellung der Ein- und Ausgabeseite für den Versuchsaufbau mit dem Vibrationsgenerator.

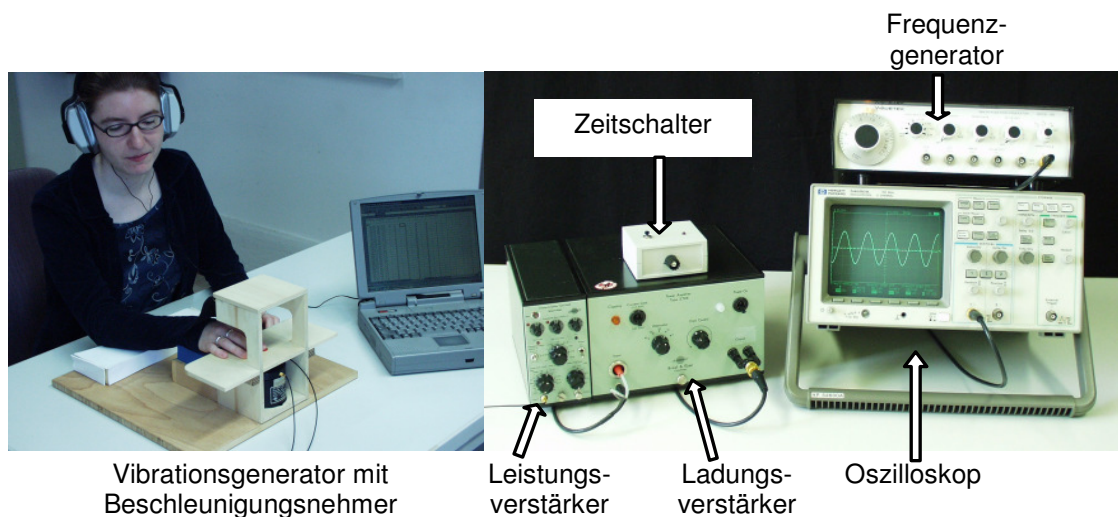


ABBILDUNG 4.22. Versuchsaufbau mit dem Vibrationsgenerator.

2. Aufbau mit dem PHANTOM Omni

Als Hardware wurde hier das SensAble PHANTOM Omni – Gerät (s. Abb. 4.02) verwendet, um die vibrotaktilen Stimuli darzubieten. Die Kraftausgabe dieses Gerätes wurde benutzt, um sinusförmige Vibrationen darzustellen. Die jeweiligen Versuchsanordnungen wurden in selbst erstellten Softwareprogrammen in der Programmiersprache C++ (insbesondere .NET) unter Zuhilfenahme der haptischen

⁵ Besonderer Dank geht an Josef Schmitt für die Hilfe bei der Messtechnik und wertvolle Hinweise für die Durchführung der Experimente und an Helmut Fleischer für die Bereitstellung der Geräte.

Bibliotheken HLAPI und HDAPI der Firma SensAble Technologies Inc. (2000) mit dem OpenHapticsToolkit implementiert.

4.2.3. Abtastfrequenz

Um über die benötigte Abtastfrequenz bei vibrotaktilem Daten etwas aussagen zu können, müssen zwei Aspekte betrachtet werden. Zum einen erscheint es wichtig, die obere Wahrnehmungsschwelle von Frequenzen zu kennen, da mit der doppelten Abtastfrequenz somit das gesamte Wahrnehmungsspektrum abgedeckt werden kann.

Der zweite zu beachtende Aspekt bezüglich der benötigten Abtastfrequenz für Vibrationen ist deren Interpretierbarkeit, was nicht gleichbedeutend mit der oberen Wahrnehmungsschwelle ist. Kennt man die „interpretierbaren“ Frequenzen, ist es ausreichend, die Abtastfrequenz an diese anzupassen. Im Unterkapitel 4.2.3.2. werden verschiedene Definitionen von „Interpretierbarkeit“ vorgestellt und erörtert.

Diese Unterpunkte – obere Wahrnehmungsschwelle von Frequenzen und Interpretierbarkeit von Frequenzen – werden in den beiden folgenden Abschnitten untersucht.

4.2.3.1. Obere Frequenzschwelle

Zu der oberen Wahrnehmungsschwelle von Frequenzen gibt es gerade bei hochfrequenten Vibrationen widersprüchliche Befunde in der Literatur.

Johansson, Landström & Lundström (1982a) geben eine obere Schwelle von 400 Hz an, Greenspan & Bolanowski (1996) eine solche von 500 Hz.

Bolanowski, Gescheider, Verrillo & Checkosky (1988) sowie Caldwell, Lawther & Wardle (1996) berichten eine obere Schwelle von 800 Hz.

Tan, Srinivasan, Eberman & Cheng (1994), Johnson (2002), England (1995) sowie Shimoga (1993a, 1993b) geben die obere Wahrnehmungsschwelle für Vibrationen mit 1000 Hz an.

Wall & Harwin (2000), Kontarinis & Howe (1995), Sharpe (1988) und Geldard (1972, S. 304 f.) geben abnehmende Sensitivitäten für Vibrationen ab ca. 320 bis 400 Hz an, berichten jedoch von flüchtigen, aber deutlichen Impulswahrnehmungen bei Vibrationen bis 10000 Hz.

Es wurde gezeigt, dass sich die Schwelle für unterschiedliche Kopplungsarten zwischen Finger und vibrotaktilem Ausgabegerät ändert (Lamoré & Keemink, 1988; Goble, Collins & Cholewiak, 1996). Das spricht dafür, dass auf Rezeptorebene eine obere Schwelle existiert, dass also die Pacini-Körperchen für sich allein genommen nur bis zu einem bestimmten Frequenzbereich reagieren, die Dämpfungs- und Trägheitseigenschaften der Haut jedoch applizierte Vibrationen abschwächen. So ist denkbar, dass bei einer Darbietung mit freier Kopplung, also reiner Kraftkopplung zwischen Finger und vibrotaktilem Ausgabegerät, von beispielsweise 1000 Hz das Gewebe selbst in Schwingungen versetzt wird, so dass nur noch zum Beispiel jeder zweite Impuls taktile an der Hautoberfläche ankommt und die resultierende Wahrnehmungsfrequenz dann bei 500 Hz liegt („Feder-Masse-Modell“, s. z.B. Tuller, Turvey & Fitch, 1982; Israr, Choi & Tan, 2006). Ebenso ist möglich, dass sich bei reiner Kraftkopplung zwischen Finger und Ausgabegerät die Vibrationen weitläufiger über die Haut ausbreiten, dabei abgeschwächt werden und dann entferntere Rezeptoren angesprochen werden.

Für die Ermittlung der oberen Frequenzschwelle wurden zwei Experimente durchgeführt, bei denen mittels Grenzmethod zwischen den Frequenzen von 200 bis 12000 Hz die Absolutschwelle in μm mittels desjenigen Versuchsaufbaus mit dem Vibrationsgenerator untersucht wurde.

Im ersten Experiment wurde eine reine Kraftkopplung zwischen Finger und Beschleunigungsnehmer realisiert, die Versuchspersonen sollten hier ihren Finger auf den Beschleunigungsnehmer legen, ohne Druck auszuüben. Im zweiten Experiment wurden dieselben Stimuli und dieselben Bedingungen verwirklicht, allerdings bestand eine feste Kopplung zwischen Finger und Beschleunigungsnehmer mittels Klettverband. Die Einspannvorrichtung, die an dem Holzhaus angebracht wurde, zeigt Abbildung 4.23.



ABBILDUNG 4.23. Einspannvorrichtung für den Finger am Holzhaus für die feste Kopplung zwischen Finger und Beschleunigungsnehmer.

Durch die feste Kopplung werden die Eigenschwingung des Gewebes und die Ausbreitung der Vibrationen auf der Hautoberfläche mit nachfolgender Dämpfung abgeschwächt. In den bisherigen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Sensitivität abnimmt, wenn eine feste Kopplung verwendet wird (Goble, Collins & Cholewiak, 1996; Lamoré & Keemink, 1988). Bei diesen Studien wurden Frequenzen bis 400 Hz bzw. bis 1000 Hz verwendet. Es bleibt die Frage offen, welche Effekte bei höheren Frequenzen auftreten.

Als untersuchte Frequenzen wurden in den hier durchgeführten beiden Experimenten jeweils die Stufen 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500, 8000, 8500, 9000, 9500, 10000, 10500, 11000, 11500 und 12000 Hz realisiert. Dabei wurde erwartet, dass für eine Reizentdeckung die Amplitude kontinuierlich zunehmen muss. Die Sensitivität sollte dabei mit fester Kopplung geringer sein als mit reiner Kraftkopplung.

Da die Aufgabe, die Versuchdurchführung und die Methode in beiden Experimenten gleich waren, werden im Folgenden diese Punkte für beide Experimente gemeinsam beschrieben.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Zunächst wurden die Probanden nach ihrem Alter, ihrem Geschlecht, ihrer Händigkeit, ob sie ein Saiteninstrument spielen und wenn ja, für wie lange, befragt.

Die Versuchspersonen saßen dann vor dem Versuchsaufbau und sollten den Finger ihrer dominanten Hand auf den Beschleunigungsnehmer legen, ohne Druck auf diesen auszuüben. Sie bekamen weißes Rauschen über geschlossene Kopfhörer, um die Ergebnisse durch die hörbaren Töne nicht zu verfälschen. Es wurden immer Sinusschwingungen appliziert.

Mit einem langsamen Drehmotor (0.5 Umdrehung/s), der am Amplitudenverstärker angebracht wurde, wurde die Amplitude zunächst von 0 μm aus in aufsteigender Richtung erhöht. Die Versuchsperson sollte sofort angeben, wenn sie eine Vibration spürte. Danach wurde die Amplitude um 40 dB erhöht und so lange heruntergedreht, bis die Versuchsperson angab, nichts mehr zu empfinden. Diese Prozedur wurde zwei Mal pro Frequenzstufe durchgeführt. Zusätzlich wurden zehn „Nullbedingungen“ eingeführt, bei denen der Frequenzgenerator keine Schwingung produzierte, um Verfälschungstendenzen bei den Versuchspersonen aufdecken zu können. Jeder Proband durchlief somit 70 Durchgänge sowohl in absteigender als auch in aufsteigender Reihenfolge. Die Versuchspersonen konnten dazwischen nach eigenem Wunsch Pausen einlegen.

Methode

a) Design

Als abhängige Variablen wurden die Schwellwerte der angegebenen Amplituden berechnet. Als unabhängige Variablen dienten die 30 Frequenzstufen.

b) Stichprobe

Am ersten Experiment („reine Kraftkopplung“) nahmen 15 Versuchspersonen teil. Eine männliche Versuchsperson wurde ausgeschlossen, da diese bei allen Nullbedingungen angab, eine Vibration wahrzunehmen. Alle anderen Versuchspersonen spürten bei der Nullbedingung nichts. In dem verbleibenden Datensatz von 14 Personen im Alter von 20 bis 27 Jahren (Mittelwert 24.00 Jahre, Standardabweichung 1.75 Jahre) befanden sich acht Frauen und sechs Männer, zwölf waren Rechtshänder und zwei Linkshänder. Nur einer gab an, Gitarre zu spielen.

Am zweiten Experiment („feste Kopplung“) nahmen 25 Personen teil, davon mussten 10 ausgeschlossen werden, da bei diesen keine bzw. nur sehr wenige Schwellen unter 1000 Hz bestimmt werden konnten. Die 15 verbleibenden Probanden waren zwischen 14 und 27 Jahre alt (Mittelwert 21.87 Jahre, Standardabweichung 2.83 Jahre), davon waren zwei weiblich und 13 männlich. Alle waren Rechtshänder. Nur eine Versuchsperson spielte ein Saiteninstrument.

Ergebnisse: Experiment 1 („reine Kraftkopplung“)

Die Absolutschwellen wurden pro Standardreiz aus den Anzeigen des Oszilloskops als Amplituden in μm berechnet als die Mittelwerte zwischen den absteigenden und aufsteigenden Vorgaben.

Keiner der demographischen Daten Alter, Geschlecht und Händigkeit zeigte eine Korrelation mit den individuellen Mittelwerten. Das Spielen eines Saiteninstruments wurde nicht ausgewertet, da hier nur eine Versuchsperson ein solches spielte. Über alle Probanden wurden 10 der 840 gegebenen Standardfrequenzen (30 x 2 x 14 Versuchspersonen) nicht wahrgenommen, wobei sich diese nicht bestimmbaren Schwellen über das gesamte Frequenzspektrum verteilten. Dieser Anteil ist vernachlässigbar.

Der Gesamtmittelwert betrug $0.97 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $0.32 \mu\text{m}$. Die Amplituden für die einzelnen Frequenzstufen werden in Tabelle 4.36 aufgeführt, die nachfolgende Abbildung 4.37 stellt diese graphisch dar.

TABELLE 4.36. Absolutschwelle für die Amplituden [μm] in Abhängigkeit von der Frequenz [Hz] bei der reinen Kraftkopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator.

Frequenz [Hz]	Kleinste wahrnehmbare Amplitude [μm]	Standardabweichung der Amplitude [μm]
200	0.96	0.61
400	1.00	1.20
600	1.18	1.47
800	1.74	1.75
1000	2.39	2.54
1200	3.66	2.18
1400	3.63	1.50
1600	3.39	1.09
1800	2.84	0.76
2000	2.47	0.44
2500	1.55	0.28
3000	0.95	0.30
3500	0.69	0.17
4000	0.54	0.10
4500	0.39	0.10
5000	0.31	0.08
5500	0.24	0.07
6000	0.20	0.04
6500	0.18	0.04
7000	0.17	0.02
7500	0.12	0.03
8000	0.10	0.02
8500	0.09	0.02
9000	0.08	0.02
9500	0.07	0.02
10000	0.06	0.01
10500	0.06	0.01
11000	0.05	0.01
11500	0.05	0.01
12000	0.05	0.01

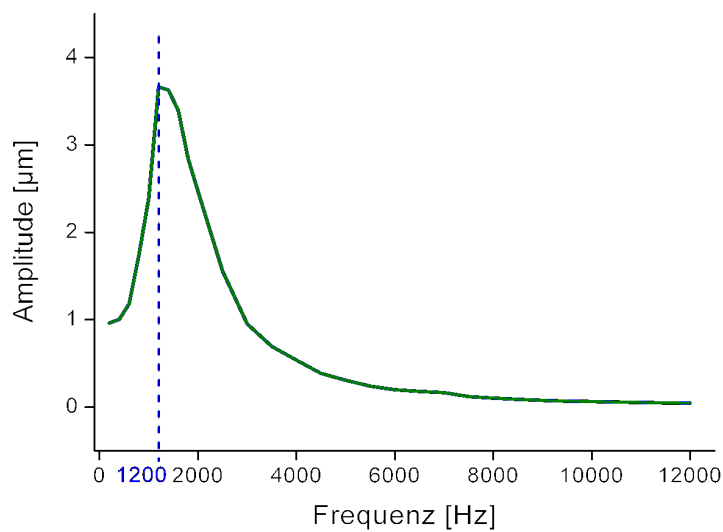


ABBILDUNG 4.24. Absolutschwelle für die Amplituden in μm in Abhängigkeit von der Frequenz [Hz] bei der reinen Kraftkopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator.

Wie aus den Daten und der graphischen Darstellung ersichtlich ist, nahm die Absolutschwelle erwartungsgemäß bis zu einer Frequenz von 1200 Hz kontinuierlich zu. Das Ergebnis bis zu diesem Frequenzbereich entsprechen denen in der Literatur bereits berichteten Resultate zur Absolutschwelle (s. Unterkap. 4.2.1.) Danach kam es jedoch zu einem rapiden Abfall. Die Amplituden, die entdeckt wurden, waren sehr gering. Ebenfalls waren die zugehörigen Standardabweichungen sehr niedrig. Unter Berücksichtigung der Gewebeeigenschaften der Haut ist dieses Ergebnis sehr unwahrscheinlich. Subjektiv berichteten die Mehrzahl der Versuchspersonen ($n = 10$), dass es in dem Frequenzbereich bis 1200 Hz sehr schwierig war, eine Vibrationsschwelle anzugeben, da hier die Vibrationen kontinuierlich wahrgenommen wurden. Bei höheren Frequenzbereichen berichteten die Probanden von einer „sprunghaften“, also diskreten Wahrnehmung von den gegebenen Vibrationen. Diese Fakten sprechen dafür, dass es sich hier um eine Auswirkung der reinen Kraftkopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator handelt und die oben genannten Effekte der Gewebeeigenschwingung bzw. die Dämpfung bei der weiteren Ausbreitung der Vibrationen greifen. Ebenfalls sind die Ergebnisse ein Hinweis darauf, dass die obere Wahrnehmungsschwelle von Vibrationsfrequenzen bei etwa 1200 Hz liegt. Um diese Effekte genauer spezifizieren zu können, wurde dieses Experiment mit einer festen Kopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator wiederholt. Bei dieser festen Kopplung werden die Gewebeeigenschwingungen sowie die Ausbreitung der Vibrationen auf der Hautoberfläche minimiert. Falls es sich hier also im Frequenzbereich über 1200 Hz nicht um einen systematischen Wahrnehmungs-, sondern um einen Kopplungseffekt handelt, sollten sich die Ergebnisse dieser beiden Experimente unterscheiden. Insbesondere sollten sich mehr nicht bestimmbare Schwellen bei Frequenzen über etwa 1200 Hz ergeben, falls dies tatsächlich die obere Grenze darstellt.

Ergebnisse: Experiment 2 („feste Kopplung“)

Wieder wurden die Amplituden in μm aus den Anzeigen des Oszilloskops als Mittelwerte zwischen den absteigenden und aufsteigenden Vorgaben pro Standardreiz berechnet.

Keiner der demographischen Daten Alter, Geschlecht und Händigkeit zeigte eine Korrelation mit den individuellen Mittelwerten. Das Spielen eines Saiteninstruments wurde nicht ausgewertet, da auch in dieser Stichprobe nur eine Versuchsperson ein Saiteninstrument spielte.

Von den 900 vorgegebenen Standardfrequenzen über alle Versuchspersonen (30 x 2 x 15 Versuchspersonen) wurden 582 nicht wahrgenommen. Diese nicht bestimmbar Schwellen befanden sich alle im höheren Frequenzbereich über 1000 Hz.

Der Gesamtmittelwert über die bestimmbar Schwellen betrug $0.79 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $1.30 \mu\text{m}$.

Tabelle 4.37 zeigt die Amplitudenwerte für die einzelnen Frequenzstufen sowie die zugehörige Anzahl der Versuchspersonen. Die darauf folgende Abbildung 4.25 stellt dies graphisch dar.

TABELLE 4.37. Absolutschwelle für die Amplituden [μm] in Abhängigkeit von der Frequenz [Hz] sowie zugehörige Versuchspersonenanzahl (n) bei der festen Kopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator.

Frequenz [Hz]	Kleinste wahrnehmbare Amplitude [μm]	Standardabweichung der Amplitude [μm]	n
200	5.86	2.10	15
400	2.53	2.03	15
600	1.65	1.00	15
800	2.04	1.36	15
1000	2.50	1.02	14
1200	2.11	0.98	13
1400	1.93	0.66	11
1600	1.23	0.69	7
1800	0.90	0.65	5
2000	1.09		3
2500	0.30		3
3000	0.10		1
3500	0.14		3
4000	0.05		2
4500	0.07		3
5000	0.07		3
5500	0.04		1
6000	0.11		1
6500	0.08		1
7000	0.02		1
7500			0
8000	0.04	0.02	4
8500	0.02	0.01	6
9000	0.02		2
9500	0.01		3
10000	0.02		2
10500	0.02		2
11000	0.01	0.01	4
11500	0.01		3
12000	0.02		1

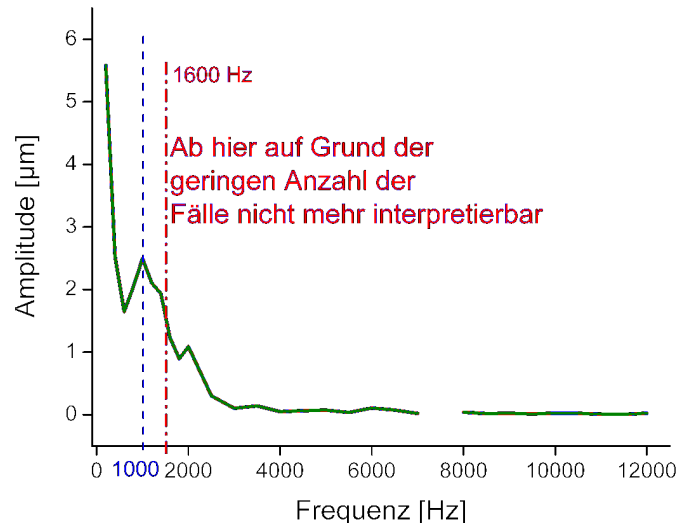


ABBILDUNG 4.25. Absolutschwelle für die Amplituden in μm in Abhängigkeit von der Frequenz [Hz] bei der festen Kopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator. Auf Grund der geringen Anzahl der Fälle kann die Kurve ab 1600 Hz (rote Linie) nicht gedeutet werden.

Ab einer Frequenz von 1600 Hz kam es zu einem signifikanten Anstieg der nicht bestimmbaren Schwellen, $\chi^2(1) = 4.27$, $p = .039$, d.h. die Detektion aller Schwellen über diesem Bereich kann auf Zufall zurückgeführt werden. Demnach konnten nur Schwellen für den Frequenzbereich unter 1400 Hz bestimmt werden.

Die feste Kopplung scheint mehrere Auswirkungen zu haben. Zum einen sind die Schwellen im Frequenzbereich zwischen 200 und 400 Hz im Vergleich zur reinen Kraftkopplung und zu den Ergebnissen in der Literatur erhöht. Die sehr hohe Sensitivität in diesem Bereich konnte hauptsächlich auf Effekte der Summation zurückgeführt werden (z.B. Craig & Sherrick, 1969; Verrillo, 1965). Dieser Effekt wurde in diesem Experiment durch die feste Kopplung zum größten Teil unterbunden, da hier eine Ausbreitung der Stimulusvibrationen über die Hautoberfläche minimiert wurde.

Zum anderen wurde ab 600 Hz bis 1000 Hz die Absolutschwelle für die Amplituden höher, danach fiel diese wieder ab, der Abfall fand jedoch nicht so rapide statt wie bei der reinen Kraftkopplung. Auch hier scheint es also eine Gewebeeigenschwingung zu geben, die durch die feste Kopplung zwar gedämpft, jedoch nicht gänzlich ausgeschaltet werden konnte (dazu müsste man den Finger so fest koppeln, dass dieser richtiggehend gequetscht wird; dies wurde hier vermieden).

Insgesamt konnte in diesem Experiment der Bereich der oberen Grenze, die nach dem vorhergegangenen Experiment vermutet wurde, bestätigt werden, diese scheint also zwischen 1000 und 1400 Hz zu liegen.

Vergleich der Ergebnisse der beiden Experimente

Da in dem Experiment mit der festen Kopplung zwischen Finger und Vibrationsgenerator lediglich bestimmbare Schwellen bis 1400 Hz gefunden werden konnten, wurde mittels einer einfaktoriellem univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung untersucht, ob sich die

beiden Experimentalgruppen („reine Kraftkopplung“ vs. „feste Kopplung“) in dem Frequenzbereich zwischen 200 und 1400 Hz bezüglich ihrer Absolutschwelle unterscheiden.

Trotz der deskriptiven Differenzen unterschieden sich die beiden Experimentalgruppen nicht signifikant voneinander, $F(1,22) = 0.98$, $\eta^2 = .043$, $p = .333$. Es kann also angenommen werden, dass die beiden Stichproben aus einer Population stammen und die oben gefundenen Effekte interpretierbar sind. Die folgende Abbildung 4.26 veranschaulicht die Verläufe der beiden Experimentalgruppen in dem Frequenzbereich bis 1400 Hz.

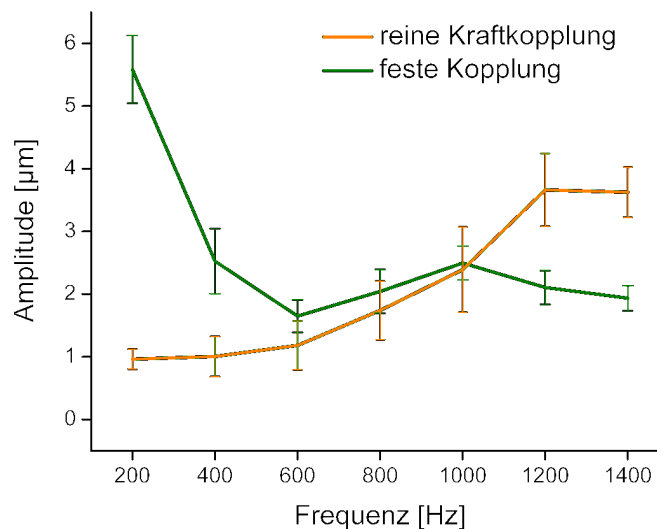


ABBILDUNG 4.26. Absolutschwelle für die Amplituden in μm für die beiden Experimentalgruppen.

4.2.3.2. Interpretierbarkeit von Vibrationen: Zusammenhang zwischen räumlicher und zeitlicher Frequenz mittels Texturmatching

Die „Interpretierbarkeit“ von Frequenzen wird in der Literatur auf unterschiedlichste Weise definiert. Diese Definitionen können grob in drei Bereiche unterteilt werden.

Zum einen wird die „Interpretierbarkeit“ auf Grund von Aufgabenerfordernissen festgelegt. Während dabei Ellis (1995) 100 Hz, Brooks (1990) 300 Hz und Shimoga (1993b) 320 Hz für die Detektion von Vibrationen wie beispielsweise Oszillation bei hartem Kontakt zwischen Werkzeug und Oberfläche als ausreichend angeben, berichtet Sharpe (1978, 1988) Erfordernisse zwischen 500 Hz und 10000 Hz für geschickte Tätigkeiten. Seine Versuchspersonen sollten verschiedene harte Materialien (z.B. Kabel, Kupfer, Eisen, Stahl, Stahldraht) mit einer Drahtzange durchschneiden und dabei das Material an Hand der dabei auftretenden Vibrationen identifizieren. Die relevanten Informationen zur Unterscheidung der Materialien lagen zwischen 500 Hz und 5000 Hz. Für die Erfüllung von Aufgaben, die resonante, flexible Belastungen sowie Belastungen mit sehr hohen Variationen in der Trägheit aufweisen, gibt Sharpe einen ausreichenden Frequenzbereich bis 500 Hz an.

Bezüglich der Interpretation nach Aufgabenerfordernissen führen alle Frequenzen oberhalb des notwendigen Frequenzbereichs nicht mehr zu einer Verbesserung der Aufgabenleistung und sind somit nicht „interpretierbar“.

Ein anderer Ansatz der Definition von „Interpretierbarkeit“ von Vibrationen stellt die Bereitstellung von Informationen über den Zustand des Hand-Objekt-Systems durch die Rezeptoren bei Objektkontakt dar. Benutzer sind in der Lage, eine „temporale Strategie“ anzuwenden. Bei niedrigen Frequenzen der Krafterückmeldung werden Formen wahrgenommen, bei hohen Frequenzen Texturen (Wall & Harwin, 2000). Zudem gibt es Hinweise darauf, dass rückgemeldete Kräfte unter 30 Hz einen Energietransfer bei der ausgeführten Kraft bewirken, über 30 Hz als Informationsquelle herangezogen werden (Wagner & Howe, 2005). Bei niedriger Skalierung dient die Krafterückmeldung als ergänzende Information, wodurch allerdings der mentale Workload erhöht wird, bei hoher Skalierung als physikalische Beschränkung (Wagner, Stylopoulos & Howe, 2002; Wagner & Howe, 2005). Ebenso werden niedrige Frequenzen zur Kraftkoordination und zur Kontrastentdeckung bei nachgiebigen Oberflächen benutzt (Kontarinis & Howe, 1995; Dhruv & Tendick, 2000). Johansson & Westling (1984) konnten durch Lokalanästhesie am Finger zeigen, dass Adaptation an Reibung zwischen Haut und Objekt benötigt wird, um die Balance zwischen Greif- und Gewichtskräften zu halten. Kontarinis & Howe (1995) unterscheiden zwischen perzeptuellen Aufgaben, bei denen die Detektion von Vibrationen das fundamentale Ziel der Aufgabe ist; Manipulationsaufgaben, bei denen Vibrationen den Zustand der Aufgaben bzw. den mechanischen Status des Hand-Objekt-Systems bei Kontakt anzeigen; und Aufgaben, bei denen die Detektion von Vibrationen unwichtig sind, d.h. wenn nur Kräfte präzise kontrolliert werden müssen.

Die hohe Sensitivität im Frequenzbereich um 250 Hz kann entweder störend wirken, z.B. als wahrgenommene Instabilität durch die in diesen Bereich fallende Resonanzfrequenz von bestimmten haptischen Ein-/Ausgabegeräten (Choi & Tan, 2004b) oder als gezielte taktile Rückmeldung zur Entdeckung und Exploration von Materialeigenschaften bei krafterückmeldenden Systemen eingesetzt werden. Howe (1992) dagegen kritisiert, dass nicht geklärt ist, ob menschliche Mechanorezeptoren Informationen über Kräfte oberhalb von 100 Hz oder über nichtlokalisierte Vibrationen über 1000 Hz bereitstellen und diese somit interpretieren können.

Der dritte große Bereich der Definition von „Interpretierbarkeit“ von Vibrationen stellt die Texturwahrnehmung, also die Wahrnehmung von Eigenschaften von Materialien und Materialoberflächen, die taktil exploriert werden, dar. Die Bewegung einer texturierten Oberfläche über die Haut ist ein räumlich-zeitliches Ereignis, da die Haut auf eine Weise räumlich verformt wird, die systematisch über die Zeit variiert (Hollins, 2002; Katz, 1925/1989). Der Großteil der Forschung zur Texturwahrnehmung beschäftigt sich mit der Wahrnehmung von Rauheit bzw. Körnigkeit, jedoch ist die Wahrnehmung von Oberflächentexturen ein multidimensionales Konstrukt, wozu auch Eigenschaften von Materialoberflächen wie weich, hart, nachgiebig, steif, warm, kalt, hohe oder niedrige Wärmeleitfähigkeit, klebrig, rutschig, löchrig usw. gehören (Lederman & Klatzky, 2004; Hollins, 2002; Hollins, Bensmaïa, Karlof & Young, 2000; Loomis & Lederman, 1986; Taylor, Lederman & Gibson, 1973). Bezüglich der Wahrnehmung von Rauheit stellte schon

Katz (1925/1989) die Duplextheorie auf, wonach grobe Texturen (räumliche Frequenz über 100-200 μm) räumlich, feine Texturen (räumliche Frequenz unter 100-200 μm) temporal kodiert werden. In einer Vielzahl von Untersuchungen konnte die Duplextheorie in ihren Grundzügen bestätigt werden (Freyberger & Färber, 2006; Hollins, Fox & Bishop, 2001; Hollins, Bensmaïa & Roy, 2002; Hollins, Bensmaïa & Washburn, 2001; Connor & Johnson, 1992; Van Doren, Pelli & Verrillo, 1987; Van Doren, 1989; Loomis & Lederman, 1986; Lederman, 1974; Lederman, 1981; Lederman, 1983; Lederman, Loomis & Williams, 1982; Lederman & Taylor, 1972).

Um die Wahrnehmung von Rauheit zu untersuchen, wurde häufig Sandpapier benutzt (z.B. Ekman, Hosman & Linström, 1965; Stevens & Harris, 1962). Die Versuchspersonen sollten dabei entweder die Rauheit mittels Magnitude Estimation einschätzen oder die verschiedenen Texturen in eine Rangordnung bringen, die Ordinaldaten wurden dann mit den physikalischen Eigenschaften der Texturoberfläche verglichen (Hollins, Bensmaïa, Karlof & Young, 2000; Stevens & Harris, 1962; Ekman, Hosman & Lindström, 1965; Hannig, Deml & Mihalyi, 2007; McGee, Gray & Brewster, 2001). Dabei stellte sich heraus, dass den Probanden die Rauheitseinschätzung bis auf wenige Vertauschungen gut gelang. Dieser Effekt wurde ebenfalls in virtueller Umgebung mit Geräten mit Punktkontakt und reiner Krafrückmeldung nachgewiesen. Es konnte gezeigt werden, dass Texturen (v.a. Richtung von Sinus- und Rechteckwellen, Unterscheidung verschiedener Materialien) auch mittels Stiften bzw. Joysticks nur mit Krafrückmeldung wahrgenommen und gut eingeschätzt werden können (Weisenberger, Krier & Rinker, 2000; Klatzky & Lederman, 1999; Klatzky, Lederman, Hamilton, Grindley & Swendsen, 2003; Wall & Harwin, 2001; Tan, Adelstein, Traylor, Kocsis & Hileman, 2006; Jansson, Billberger, Petrie, Caldwell, Kornbrot, Fänger, König, Hardwick & Furner, 1999; McGee, Gray & Brewster, 2001; Moy, Singh, Tan & Fearing, 2000; Okamura, Cutkosky & Dennerlein, 2001; Wall & Harwin, 2000). Dabei ist die Texturwahrnehmung besser, wenn zusätzlich taktile Stimulation appliziert wird (Ikei & Shiratori, 2002).

Obwohl bei der Wahrnehmung von groben Texturen (räumliche Frequenz über 100-200 μm) die räumliche Information ausreichend ist, also auch keine Bewegung über die Hautoberfläche stattfinden muss, um die Rauheit wahrnehmen und einschätzen zu können (Freyberger & Färber, 2006; Gescheider, 1965), können hier auch temporale Strategien von Versuchspersonen eingesetzt werden (Cascio & Sathian, 2001; Konyo, Yoshida, Tadohoro & Saiwaki, 2005; Kyung, Ahn, Kwon & Srinivasan, 2006).

Dabei sind Sägezahn- und Rechteckformen besser diskriminierbar als sinusförmige Texturen (Doshier & Hannaford, 2005). Es ist jedoch unklar, ob nur die Amplitudeninformation primär zur Rauheitseinschätzung beiträgt (Bensmaïa & Hollins, 2003) oder ob sowohl Frequenz und Amplitude gleichermaßen beteiligt sind (Kyung & Kwon, 2006).

Die Rauheitseinschätzung ist ebenfalls ein intersensorischer Prozess. McGee, Gray & Brewster (2002) konnten zeigen, dass die Einschätzung von Rauheit mit zusätzlicher auditiver Rückmeldung besser wird. Poling, Weisenberger & Kerwin (2003) fanden bei sinusförmigen Gittern, dass die Rauheit bei niedrigen Amplituden von 0.01 cm hauptsächlich haptisch, bei hohen Amplituden von 1.00 cm hauptsächlich visuell und bei Amplituden dazwischen von

0.05 cm sowohl haptisch als auch visuell eingeschätzt wird. Die Einschätzungsleistung war bei der intersensorischen Bedingung am besten. Analog dazu fanden Taylor, Lederman & Gibson (1973), dass die rein haptische Texturdiskrimination bei Erwachsenen besser ist als bei Kindern, diese jedoch nicht geübt werden kann; die trainierbare Komponente ist die visuelle Texturdiskrimination.

Bei dieser Forschung bleibt jedoch die Frage bestehen, ob und wie räumliche und zeitliche Frequenzen perzeptuell zusammenhängen. Wenn man über eine Oberfläche mit regelmäßigem Muster streicht, entsteht durch deren räumliche Frequenz auch eine zeitliche Frequenz. Da hier verschiedene Rezeptortypen beteiligt sind, nämlich Merkel-Zellen für Einbuchtungen, Meissner- und Pacini-Körperchen für vibrotaktile Informationen, wobei auch die Einbuchtung kodiert wird, ist es wahrscheinlich, dass sich perzeptuell räumliche und zeitliche Frequenzen voneinander unterscheiden. Es muss also nicht zwangsläufig der Fall sein, dass Versuchspersonen dieselbe zeitliche Frequenz wahrnehmen, die die Textur räumlich vorgibt. Wird ein haptisches Ein-/Ausgabegerät bei Telepräsenzsystemen mit reiner Kraftrückmeldung eingesetzt, ist es wichtig zu wissen, wie Oberflächentexturen in der zeitlichen Dimension rückgemeldet werden sollen.

In dem folgenden Experiment wird der Frage nachgegangen, ob räumliche Frequenzen perzeptuell mit zeitlichen übereinstimmen. Dabei wurde keine Beurteilungsdimension vorgegeben, die Versuchspersonen sollten die vorgegebenen Oberflächentexturen nicht auf Grund ihrer Rauigkeit, Körnigkeit oder Ähnliches einschätzen. Die Probanden trugen hier weder einen Sichtschutz noch bekamen sie Rauschen, um den intersensorischen Anwendungsbezug zu wahren.

Es wurden drei verschiedene Oberflächentexturen jeweils auf einer Platte von 9.0 x 9.0 cm vorgegeben. Die erste war rechteckförmig, wobei die Rechtecke immer dieselbe Breite von 2.00 mm hatten und der Abstand zwischen den Rechtecken variiert wurde (Abstand 1.70, 3.40 und 5.10 mm). Die zweite Textur war wellenförmig, hier wurde der Durchmesser der verwendeten Rundholzstäbe variiert (2.25, 2.90 und 4.10 mm). Bei der dritten Textur handelte es sich um Schleifpapiere verschiedener Körnung (120er, 80er und 40er). Jede Textur kam in drei verschiedenen Variationen der räumlichen Frequenz vor. Alle Texturoberflächen wurden schwarz eingefärbt, um eine Diskrimination auf Grund von Farbungleichheiten auszuschließen.

Die Versuchspersonen sollten zu jeder Textur eine zeitliche Frequenz einstellen, die perzeptuell den vorgegebenen räumlichen Frequenzen entspricht, sie sollten also eine temporale Strategie anwenden. Die Amplitude wurde auf 1.2 N festgelegt und konnte von den Probanden nicht variiert werden.

Da die Herstellerangaben bei Schleifpapieren bezüglich deren Körnung sehr ungenau sind, wurden die Werte verwendet, die von Hannig, Deml & Mihalyi (2007) mittels eines professionellen Rauheitsmessgeräts bei der physikalisch objektiven Körnung gemessen wurden. In dem durchgeführten Experiment wurde dasselbe Schleifpapier desselben Herstellers verwendet. In Tabelle 4.38 sind für alle Texturen die räumlichen Frequenzen sowie die entstehenden zeitlichen Frequenzen, die bei einer Überstreichung der Texturoberfläche (Breite 9.0 cm) in 1 s am Finger entstehen, angegeben.

TABELLE 4.38. Räumliche und entstehende zeitliche Frequenzen der Oberflächentexturen.

Texturart	Texturgröße	Räumliche Frequenz [1/cm]		Zeitliche Frequenz [Hz]	
Rechteckform	klein	2.7		24	
	mittel	1.9		17	
	groß	1.4		13	
Wellenform	klein	4.4		40	
	mittel	3.4		31	
	groß	2.4		22	
		theoretisch (Hersteller- angaben)	physikalisch gemessen (Hannig et al., 2007)	theoretisch (nach Hersteller- angaben)	physikalisch gemessen (nach Hannig et al, 2007)
Schleifpapier	klein (120er Körnung)	47	24	425	218
	mittel (80er Körnung)	31	17	283	153
	groß (40er Körnung)	16	10	142	87

Da nach der Duplextheorie Makrotexturen hauptsächlich räumlich kodiert werden, sollten sich bei der Rechteck- und der Wellentextur räumliche und zeitliche Frequenz nicht entsprechen. Dass diese beiden Texturen zeitlich nicht interpretierbar sind, sollte sich auch darin zeigen, dass verschiedene vorgegebene Anfangsvibrationen nicht zu denselben eingestellten Endvibrationen bei derselben Textur führen. Ebenso sollte es keinen Unterschied machen, ob die Versuchspersonen die Frequenzen in verschiedenen Schrittweiten variieren können. Die Rechteckform sollte dennoch besser eingeschätzt werden können als die Wellenform (s. auch Dosher & Hannaford, 2005), die zeitlich eingestellten Frequenzen sollten hier näher an den räumlichen liegen als bei der Wellenform.

Da die Schleifpapiere Mikrotexturen darstellen, sollte es hier im Gegensatz zu den beiden Makrotexturen möglich sein, diese mit Hilfe einer temporalen Strategie zu interpretieren. Wenn dabei primär die Frequenzinformation genutzt wird, sollten sich die räumlichen und zeitlichen Frequenzen entsprechen. Wenn jedoch vor allem die Amplitude als Information herangezogen wird, sollte die Einstellung der zeitlichen Frequenz in Bezug zu den räumlichen Frequenzen nicht besser sein als bei den beiden Makrotexturen.

Bei allen Texturen sollten die Versuchspersonen in der Lage sein, diese konsistent in eine Rangreihe bezüglich der eingestellten zeitlichen Frequenzen zu bringen und dieselbe Textur wiederholt mit einer ähnlichen temporalen Frequenz zu belegen.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen sollten zu jeder Textur eine zeitliche Frequenz mit dem PHANTOM einstellen, die perzeptuell den vorgegebenen räumlichen Frequenzen entspricht. Sie sollten dabei auf die Geschwindigkeit, also auf die Frequenz achten. Die Amplitude konnte nicht variiert werden, diese wurde auf 1.2 N festgelegt.

Die Probanden saßen vor einer befestigten Schaumstoffvorrichtung, auf der die verschiedenen Oberflächen dargeboten wurden. Die Spitze des PHANTOMS vibrierte horizontal in einer daneben stehenden Schaumstoffauflage. Abbildung 4.27 zeigt den experimentellen Aufbau sowie die verwendeten Oberflächentexturen.



ABBILDUNG 4.27. Experimentalaufbau mit den verwendeten Texturen.

Die Versuchspersonen sollten mit dem Zeigefinger ihrer dominanten Hand zunächst die ihnen vorgegebene Oberfläche mit einer Geschwindigkeit von 9.0 cm/s (die Texturplatte also in einer Sekunde) horizontal abfahren und danach den Zeigefinger auf einen markierten Punkt (grün in der Abbildung 4.27) des horizontal vibrierenden Stylus des PHANTOM legen, ohne dabei Druck auszuüben. Sie sollten das Vibrieren (zeitliche Frequenz) mit Hilfe von Tastatureingaben („+“ für schneller bzw. „-“ für langsamer) so einstellen, dass diese mit der Oberflächenempfindung beim Überstreichen (räumliche Frequenz) übereinstimmte. Durch die Enter-Taste konnten die Versuchspersonen ihre Entscheidung bestätigen und der nächste Durchlauf begann und die Frequenz wurde wieder auf die zugewiesene Ausgangsfrequenz für die Versuchsperson gesetzt. Der zur Verfügung stehende Frequenzbereich rangierte von 0 bis 500 Hz. Die Streichgeschwindigkeit über die Textur wurde zu Beginn durch einen genau 1 s dauernden Ton eingeübt. Bei jedem Durchgang wurde der Ton beim Überstreichen der Textur wieder vorgegeben, um eine konstante Streichgeschwindigkeit zu gewährleisten. Die Versuchspersonen konnten diese Prozedur bei jeder Textur so häufig wie nötig wiederholen. Nach Bedarf wurden den Probanden Pausen gewährt, in denen sie ihren Finger auf einen nachgiebigen Silikonwürfel legen konnten, um einer Sättigung der Rezeptoren vorzubeugen.

Zunächst konnten die Probanden diese Prozedur mit einem Schleifpapier mit 30er Körnung einüben, sie konnten dann den Beginn der Experimentaldurchgänge selber bestimmen.

Die Vorgabe der Oberflächentexturen bei der Experimentalvorgabe wurde mittels lateinischen Quadrats variiert, so dass keine Textur direkt aufeinanderfolgend vorgegeben wurde. Es wurden fünf verschiedene mögliche Reihenfolgen über alle Versuchspersonen realisiert.

Mehrere Bedingungen und zwei Versuchspersonengruppen wurden verwirklicht, um die oben aufgestellten Hypothesen untersuchen zu können. Die Reihenfolge der vorgegebenen Texturen wurde dabei über die Gruppen parallelisiert.

Eine Gruppe erhielt immer dieselbe zeitliche Ausgangsfrequenz, diese Gruppe wurde unterteilt in eine, der als Ausgangsfrequenz 40 Hz und eine andere, der 250 Hz zugeteilt wurde. Bei der Einstellung konnten diese beiden Untergruppen die zeitliche Frequenz in 1 Hz – Schritten variieren. Jede Textur wurde dabei fünf Mal vorgegeben.

Um zu untersuchen, ob die vorgegebene Anfangsfrequenz intraindividuell zu ähnlicheren eingestellten Endfrequenzen führen wie interindividuell, wurde eine weitere Versuchspersonengruppe gebildet, die sowohl die Anfangsfrequenz von 40 Hz als auch die Anfangsfrequenz von 250 Hz erhielt. Die beiden Anfangsbedingungen wurden dabei vollständig balanciert. Jede Textur wurde für jede Anfangsfrequenz drei Mal vorgegeben, also insgesamt sechs Mal. Diese Versuchspersonengruppe wurde weiterhin unterteilt in eine Gruppe, die die zeitlichen Frequenzen in 1 Hz – Schritten variieren konnten und eine andere Gruppe, die die Endfrequenz nur in 10 Hz – Schritten einstellen konnte.

Am Ende des Versuchs füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM, ob sie ein Saiteninstrument spielen und wenn ja, über welchen Zeitraum mit wie vielen durchschnittlichen Übungsstunden pro Monat, enthielt.

Methode

a) Design

Die abhängige Variable war die eingestellte Endfrequenz in Hz.

Als unabhängige Gruppierungsvariable diente bei beiden Versuchspersonengruppen die Reihenfolge (5 Stufen), als unabhängige Messwiederholungsfaktoren die Texturart (Rechteckform, Wellenform vs. Schleifpapier) und die Texturgröße (klein, mittel vs. groß).

In der Gruppe, die immer dieselbe Ausgangsfrequenz erhalten hatte und die Texturen fünf Mal vorgelegt bekommen hatten, waren die unabhängigen Variable die Ausgangsfrequenz (40 Hz, 250 Hz) als Gruppierungsfaktor sowie die Wiederholung der Textur als Messwiederholungsfaktor [5 x 3 x 3 x 2 x 5 – Design]

Bei der Gruppe, bei der beide Ausgangsfrequenzen vorgegeben wurden, waren die unabhängigen Variablen die Ausgangsfrequenz (40 Hz, 250 Hz) und die Wiederholung der Textur (3 Stufen) als Messwiederholungsfaktoren und die Schrittweite der einstellbaren Frequenzen (1 Hz vs. 10 Hz) als Gruppierungsfaktor [5 x 3 x 3 x 2 x 3 x 2 – Design].

b) Stichprobe

Insgesamt nahmen 36 Versuchspersonen an diesem Experiment teil. Zwei wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da diese bei allen bzw. fast der Hälfte der vorgelegten Oberflächentexturen keine zeitliche Frequenz einstellen konnten. Insgesamt befanden sich in der Gesamtstichprobe sieben Frauen und 27 Männer im Alter zwischen 20 und 34 Jahren (Mittelwert 25.29 Jahre, Standardabweichung 3.25 Jahre).

19 Versuchspersonen wurden der Gruppe mit der Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor zugeteilt. Drei der hier zugeteilten Probanden konnten zu den Schleifpapieren keine zeitliche Frequenz einstellen. Von den Versuchspersonen waren zwei weiblich und 17 männlich im Alter zwischen 20 und 29 Jahren (Mittelwert 24.84 Jahre, Standardabweichung 2.97 Jahre). Bis auf eine Versuchsperson waren alle Rechtshänder. 18

Versuchspersonen gaben an, keine bis mittlere Erfahrung mit dem PHANTOM zu haben, eine Person gab an, sehr viel Erfahrung mit dem PHANTOM zu haben. Drei von ihnen spielten Gitarre mit einer Dauer von 1, 4 und 10 Jahren und einer durchschnittlichen Übungsdauer von 3, 8 und 13 Stunden pro Monat.

Die restlichen 15 Teilnehmer befanden sich in der Gruppe mit der Ausgangsfrequenz als Messwiederholungsfaktor. Zehn von ihnen konnten die Endfrequenz in 1 Hz – Schritten variieren, fünf in 10 Hz – Inkrementen. Eine Versuchsperson in dieser Gruppe konnte keiner Schleifpapierart eine zeitliche Frequenz zuweisen, eine andere Versuchsperson konnte dies nicht bei einigen Rechteck- und Wellenformarten. Unter den Versuchspersonen waren alle Rechtshänder, fünf Frauen und zehn Männer im Alter von 21 bis 34 Jahren (Durchschnittsalter 25.87 Jahre, Standardabweichung 3.60 Jahre). Zwölf Versuchspersonen hatten keine bis mittlere Erfahrung mit dem PHANTOM, eine hatte viel Erfahrung. In dieser Gruppe spielte eine Person Gitarre über eine Zeitdauer von 3 Jahren mit durchschnittlich 15 Stunden Übungszeit pro Monat.

Ergebnisse

Die Endfrequenz wurde nach dem Drücken der Enter-Taste durch die Versuchsperson jeweils gespeichert und der jeweils vorgegebenen Oberflächentextur zugeordnet.

Zwischen den demographischen Daten Alter, Geschlecht und Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM und den individuellen Mittelwerten der Versuchspersonen ergaben sich keine signifikanten Korrelationen, die Einschätzung der zeitlichen Frequenzen war somit unabhängig von diesen Daten. Die Händigkeit und das Spielen eines Saiteninstrumentes wurden nicht ausgewertet, da hierzu zu wenige Fälle vorlagen.

Zunächst wurden die beiden Experimentalgruppen getrennt voneinander analysiert, um diese später nach Zusammenfassung an Hand der nicht signifikanten Faktoren vergleichen zu können.

Die deskriptiven Daten beider Gruppen sind der Tabelle 4.39 zu entnehmen.

TABELLE 4.39. Deskriptive Daten für die Texturart, die Texturgröße und die Anfangsfrequenz für beide Experimentalgruppen. Werte in Klammern sind die zugehörigen Standardabweichungen. Zusätzlich sind die berechneten entstehenden zeitlichen Frequenzen aufgeführt.

		Experimentalgruppe 1 (Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor)		Experimentalgruppe 2 (Ausgangsfrequenz als Messwiederholungsfaktor)		
		berechneter Wert [Hz]	Ausgangs- frequenz 40 Hz	Ausgangs- frequenz 250 Hz	Ausgangs- frequenz 40 Hz	Ausgangs- frequenz 250 Hz
Texturart	Texturgröße	Mittelwerte [Hz] (Standardabweichungen [Hz])				
Rechteck- form	klein	24	93 (58)	212 (54)	119 (50)	209 (97)
	mittel	17	76 (68)	184 (65)	86 (51)	146 (120)
	groß	13	62 (68)	130 (64)	104 (36)	132 (96)
Wellenform	klein	40	91 (53)	240 (50)	113 (56)	210 (106)
	mittel	31	79 (53)	220 (50)	97(66)	182 (107)
	groß	22	68 (52)	197 (49)	95 (64)	188 (136)
Sandpapier	klein (120er)	218	105 (60)	288 (57)	144 (82)	251 (87)
	mittel (80er)	153	104 (62)	265 (59)	146 (97)	225 (97)
	groß (40er)	87	98 (61)	256 (58)	161 (101)	229 (108)

Aus der Tabelle 4.39 wird erkenntlich, dass zwar die Rangreihen der Texturgrößen hauptsächlich richtig sind, die Frequenzeinschätzungen jedoch stark von den berechneten differieren und bei beiden Experimentalgruppen von der vorgegebenen Ausgangsfrequenz abhängen.

Bei der Experimentalgruppe mit der Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor betragen die Mittelwerte für die fünf Wiederholungen zwischen 149 und 161 Hz, die fünf verschiedenen Reihenfolgen hatten Mittelwerte zwischen 139 und 179 Hz.

Um die Unterschiede der eingestellten Frequenzen bei dieser Experimentalgruppe bezüglich der einzelnen Faktoren zu untersuchen, wurde eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit der abhängigen Variablen eingestellte Frequenz und den Messwiederholungsfaktoren Texturart (Rechteckform, Wellenform, Sandpapier), Texturgröße (klein, mittel, groß) und Wiederholung derselben Oberflächentextur (5 Stufen) sowie den Gruppierungsfaktoren Ausgangsfrequenz (40 Hz, 250 Hz) und Reihenfolge der Vorgabe (5 Stufen) berechnet. Tabelle 4.40 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse. Da keine der Wechselwirkungen signifikant wurde, sind diese aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in der Tabelle aufgeführt.

TABELLE 4.40. Ergebnisse der Varianzanalyse für die Experimentalgruppe mit der Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor.

Quelle	df	F	η^2	<i>p</i>
zwischen Vpn				
Ausgangsfrequenz	1	34.72*	.832	.001
Reihenfolge	4	0.44	.200	.778
Fehler	7	(91165.34)		
innerhalb Vpn				
Texturart	2	11.52 ^a *	.622	.011
Fehler	14	(5376.37)		
Texturgröße	2	22.95*	.766	< .000
Fehler	14	(3339.36)		
Wiederholung	4	0.50 ^a	.066	.520
Fehler	28	(20658.98)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsummen

^a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant ($\alpha = 5\%$)

Die Ausgangsfrequenz zeigte einen signifikanten Einfluss auf die eingestellte Frequenz, beim Anfangswert von 40 Hz waren die resultierenden Frequenzen niedriger als beim Anfangswert von 250 Hz. Die Versuchspersonen variierten somit die Frequenzen nicht im gesamten zur Verfügung stehenden Frequenzbereich, sondern blieben relativ konstant in ihrem Anfangsbereich, dieser Effekt zeigte sich sehr stark bei der Rechteckform sowie bei der Wellenform und etwas weniger ausgeprägt beim Sandpapier. Beides entspricht den Vorhersagen und ist ein erstes Indiz dafür, dass räumliche und zeitliche Frequenzen perceptuell unterschiedlich sind. Es könnte sich jedoch auch um einen Effekt der Einführung der Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor handeln. Bei den deskriptiven Daten ist eine leichte Tendenz erkennbar, dass die Ausgangsfrequenzen als Messwiederholungsfaktor weniger unterschiedliche Einstellungen der Frequenz nach sich ziehen und die

Versuchspersonen ihre Einschätzung eher im Mittelbereich angleichen. Dieser Punkt wird bei der Analyse der Experimentalgruppe mit der Anfangsfrequenz als Messwiederholungsfaktor behandelt.

Die drei verschiedenen Oberflächentexturen wurden ebenfalls mit unterschiedlichen Frequenzen belegt, was sich in der Signifikanz des Faktors Texturart niederschlägt. Da sich die berechneten Frequenzbereiche bei der Rechteckform und der Wellenform überlappen, kann darauf geschlossen werden, dass die Form der beiden Oberflächentexturen einen Wahrnehmungsunterschied nach sich zieht.

Die Anordnung der Texturgrößen in eine Rangreihe gelingt den Versuchspersonen (Haupteffekt des Faktors Texturgröße), sie belegten sogar dieselbe Oberflächentextur wiederholt mit derselben Frequenz (der Faktor Wiederholung wurde nicht signifikant). Diese Effekte wurden ebenfalls vorhergesagt.

Die verschiedenen Vorgaben in der Reihenfolge führten nicht zu verschiedenen Einstellungen der Endfrequenz, diese sind also unabhängig von dieser experimentellen Variation.

In Bezug auf die andere Experimentalgruppe mit der Ausgangsfrequenz als Messwiederholungsfaktor bewegten sich die Mittelwerte für die drei Wiederholungen zwischen 153 und 164 Hz und für die fünf verschiedenen Reihenfolgen zwischen 145 und 179 Hz. Die Gruppe, die die Endfrequenz in 1 Hz – Schritten einstellen konnten, wiesen einen Mittelwert von 157 Hz auf, die Gruppe mit den 10 Hz – Schritten einen solchen von 158 Hz.

Für die Untersuchung der Auswirkung der unabhängigen Variablen auf die eingestellten Frequenzen wurde eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit der abhängigen Variablen eingestellte Frequenz und den Messwiederholungsfaktoren Texturart (3 Stufen), Texturgrößen (3 Stufen), Wiederholung derselben Textur (3 Stufen) und Ausgangsfrequenz (2 Stufen) und den Gruppierungsfaktoren variierbares Frequenzintervall (1 Hz – Schritte vs. 10 Hz – Schritte) und Reihenfolge der Vorgabe (5 Stufen) berechnet. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in Tabelle 4.41 wiedergegeben, wiederum sind nur die Haupteffekte aufgeführt.

TABELLE 4.41. Ergebnisse der Varianzanalyse für die Experimentalgruppe mit der Ausgangsfrequenz als Messwiederholungsfaktor.

Quelle	df	F	η^2	p
zwischen Vpn				
Frequenzintervall	1	< 0.00	< .000	.987
Reihenfolge	4	0.12	.103	.970
Fehler	4			
innerhalb Vpn				
Texturart	2	26.21*	.868	< .000
Fehler	8	(8337.19)		
Texturgröße	2	29.85*	.882	< .000
Fehler	8	(1618.36)		
Wiederholung	2	2.31	.366	.161
Fehler	8	(3252.63)		
Ausgangsfrequenz	1	8.47*	.679	.044
Fehler	4	(122090.29)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsummen

*: signifikant ($\alpha = 5\%$)

Wie Tabelle 4.41 zeigt, wurden die Ergebnisse der Experimentalgruppe mit der Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor auch bei dieser Experimentalgruppe gefunden. Auch die Ausgangsfrequenz führte zu unterschiedlich eingestellten Endfrequenzen in Abhängigkeit des Frequenzbereichs. Die Versuchspersonen blieben also auch dann eher im selben Frequenzbereich, wenn ihnen beide Ausgangsfrequenzen vorgegeben wurden. Zusätzlich führte die Variationsmöglichkeit in 10 Hz – Schritten nicht zu einer verbesserten Einschätzung der zeitlichen Frequenz, auch hier blieb der Trend, im selben Frequenzbereich zu bleiben, erhalten. Dies kann ebenfalls als fehlende Passung von räumlicher und zeitlicher Frequenz bezüglich der Wahrnehmung deklariert werden.

Um zu überprüfen, ob es zu einer Angleichung der eingestellten Endfrequenzen kommt, wenn die Ausgangsfrequenz als Messwiederholungsfaktor vorgegeben wird, wurden sowohl für die Ausgangsfrequenz von 40 Hz als auch für die Ausgangsfrequenz von 250 Hz eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Messwiederholungsfaktoren Texturart (3 Stufen) und Texturgröße (3 Stufen) und dem Gruppierungsfaktor Experimentalgruppe (2 Stufen) berechnet.

Bei beiden Varianzanalysen erwies sich der Faktor Experimentalgruppe als nicht signifikant, $F_{40\text{ Hz}}(1,18) = 2.27$, $\eta^2 = .112$, $p = .149$ bzw. $F_{250\text{ Hz}}(1,22) = 0.62$, $\eta^2 = .027$, $p = .441$. Es kam also nicht zu einer besseren Angleichung der eingestellten Frequenzen, wenn die Ausgangsfrequenz als Gruppierungsfaktor vorgegeben wurde.

Die Entsprechung von räumlichen und zeitlichen Frequenzen wurde über die gesamte Stichprobe durch mehrere Einstichproben-t-tests gegen den jeweils berechneten Frequenzwert als Testwert ermittelt (der α -Fehler wurde mittels Bonferroni-Korrektur korrigiert). Dabei wurden die Mittelwerte über jede Texturart und Texturgröße herangezogen. Tabelle 4.42 zeigt die Ergebnisse dieser Analysen.

TABELLE 4.42. Ergebnisse der Einstichproben-t-tests gegen den berechneten Frequenzwert. Das Signifikanzniveau wurde mittels α -Fehler-Korrektur angepasst.

Textur	Texturgröße	Empirischer Wert	Testwert	t	df	p
Rechteckform	klein	158	24	12.61	33	< .000
	mittel	127	17	9.97	33	< .000
	groß	108	13	7.99	33	< .000
Wellenform	klein	166	40	10.24	33	< .000
	mittel	151	31	10.32	33	< .000
	groß	141	22	10.76	33	< .000
Schleifpapier	klein (120er)	202	218	-1.02	31	.316
	mittel (80er)	193	153	2.89	30	.063
	groß (40er)	192	87	8.25	32	< .000

Die eingestellten Werte für die Rechteckform und die Wellenform unterschieden sich signifikant vom Testwert, die räumlichen Frequenzen konnten hier also von den Versuchspersonen nicht an die entsprechenden zeitlichen Frequenzen angepasst werden. Die Hypothese, die Rechteckform sei besser zuordenbar als die Wellenform, konnte nicht bestätigt werden. Möglicher Weise gilt diese Beziehung nur bei feineren Texturen und bedarf weiterer Forschung.

Bei den Sandpapieren konnten die kleine und die mittlere Texturgröße (120er und 80er Körnung) temporal angepasst werden, die temporale Strategie der Versuchspersonen war hier demnach erfolgreich. Das Sandpapier mit der größten Körnung (40er) konnte nicht temporal angepasst werden, für die erfolgreiche Anwendung dieser Strategie scheinen demnach höhere Frequenzen vonnöten zu sein.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich bei der Wahrnehmung von Makrotexturen räumliche und zeitliche Frequenzen nicht entsprechen. Sie können von den Probanden nicht mit Hilfe einer temporalen Strategie in denselben Frequenzbereich angeordnet werden. Dies zeigt sich auch darin, dass die Versuchspersonen bei der Vorgabe verschiedener Anfangsfrequenzen Schwierigkeiten hatten, den theoretisch passenden Frequenzbereich zu finden. Das wurde auch nicht durch eine größere Schrittweite bei der Einstellung der Frequenzen verbessert. Insgesamt wurden die zeitlichen Frequenzen bei den Makrotexturen systematisch extrem überschätzt, hier zeigten sich keine Unterschiede zwischen Rechteck- und Wellenform.

Bei den Mikrotexturen konnte die temporale Strategie erfolgreicher angewendet werden, die Versuchspersonen bewegten sich hier im theoretisch passenden Frequenzbereich. Die feineren Körnungen der verwendeten Schleifpapiere können also nur mit Hilfe der temporalen Information enkodiert werden, die räumliche Information ist hier nicht unbedingt notwendig.

Bei allen Oberflächentexturgrößen gelang es den Versuchspersonen, diese in eine richtige Rangreihe zu bringen.

Daraus lässt sich schließen, dass man Texturen nicht wirklichkeitstreu in ihrer zeitlichen Frequenz nachbilden muss, wenn man diese aus einer entfernten oder virtuellen Umgebung mit einem haptischen Ein-/Ausgabegerät mit Punktkontakt rückmeldet. Allerdings sollte die Rangreihe bei verschiedenen groben Texturen bei der Rückmeldung gewahrt bleiben.

Da Mikrotexturen mit einer temporalen Strategie enkodiert werden können und in Anbetracht der oben genannten Befunde aus der Literatur, sollte die Abtastfrequenz bei der Darstellung von hochfrequenten Vibrationen (ohne Berücksichtigung der in Kapitel 4.1.3. dieser Arbeit diskutierten Systemanforderungen) mindestens 1000 Hz betragen, so dass mindestens 500 Hz dargestellt werden können (Nyquist-Shannon-Theorem, Shannon & Weaver, 1976).

4.2.4. Quantisierungsintervall für Frequenz

Um das Quantisierungsintervall für die Frequenzen bei vibrotaktilen Daten adäquat für den Menschen einzustellen, ist es sinnvoll, dessen Auflösungsvermögen von Vibrationsfrequenzen, also den ebenmerklichen Unterschied, zu ermitteln. In der Literatur rangieren Werte zwischen 3% für den Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 256 Hz (Franzén & Nordmark, 1975) bis 38% bei einer Frequenz von 200 Hz (Goff, 1967). Manche Forscher berichten eine höhere Sensitivität für Vibrationsunterschiede mit zunehmender Frequenz analog zur Absolutschwelle (s. Abb. 4.20; Goff, 1967; Rothenberg, Verrillo, Zahorian, Brachman & Bolanowski, 1977; Mowbray & Gebhard, 1957), andere wiederum geben an, dass der ebenmerkliche Unterschied für Vibrationen unabhängig von der Frequenzzunahme, also konstant ist (Franzén & Nordmark, 1975; Craig, 1972; Craig, 1974).

Gewöhnlich werden bei der Erhebung von Differenzschwellen für vibrotaktile Daten in Voruntersuchungen die zugehörigen individuellen Intensitätsschwellen (Amplitude) gemessen, um die subjektive Intensität konstant zu halten (z.B. Goff, 1967; Rothenberg, Verrillo, Zahorian, Brachman & Bolanowski, 1977; LaMotte & Mountcastle, 1975). Für Entwickler und Benutzer von Telepräsenzsystemen ist es jedoch nicht sinnvoll, für jeden Benutzer die subjektive Intensität anzupassen.

Weiterhin ist unklar, ob die Unterschiedsschwelle für Vibrationen vom haptischen Ein-/Ausgabegerät abhängig ist, ob dieses also einen Einfluss auf die Differenzierung von Vibrationen nimmt. Dies ist eine wichtige Information für Entwickler und Benutzer von taktilen und krafrückmeldenden Geräten.

Um diese Fragestellungen zu beantworten, wurden zwei Experimente durchgeführt, bei denen der ebenmerkliche Frequenzunterschied bei sinusförmigen Vibrationen über einen großen Frequenzbereich untersucht wurde. Die beiden Experimente unterscheiden sich hauptsächlich im verwendeten haptischen Ein-/Ausgabegerät. In beiden Experimenten wurde die Amplitude (bzw. auch die Beschleunigung im ersten Experiment) jeweils konstant gehalten und nicht individuell angepasst, da dies wie bereits erwähnt für den Anwendungsfall nicht pragmatisch ist.

4.2.4.1. Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds für Frequenz mit dem Vibrationsgenerator

Der im Kapitel 4.2.2. beschriebene Versuchsaufbau mit dem Vibrationsgenerator wurde benutzt, um den ebenmerklichen Unterschied für Frequenzen bei Vibrationen zu untersuchen.

Da die Absolutschwelle für Vibrationen bis 250 Hz stetig abnimmt und ein Minimum erreicht, wurde bei der Auswahl der Standardreize der Bereich bis 250 Hz feiner aufgelöst, zusätzlich sollte ein großer Frequenzbereich abgedeckt werden. Als Standardvibrationen wurden somit 100, 150, 200, 250, 350, 500 und 700 Hz ausgewählt. Alle bestanden aus sinusförmigen, nicht überlagerten Schwingungen.

Da die subjektive Intensität nicht erfasst und somit nicht konstant gehalten wurde, wurde als zusätzliche Variation entweder die Amplitude bei 15 μm oder die Beschleunigung der Vibrationen konstant gehalten. Bei den Standardvibrationen von 100 bis 250 Hz betrug die konstante Beschleunigung 75 m/s^2 , bei den Frequenzen von 250 bis 700 Hz wurde die Beschleunigung von 750 m/s^2 realisiert. Dieser Wechsel bei den hohen Frequenzen war notwendig, damit die resultierenden Amplituden nicht unter die Wahrnehmungsschwelle fallen (s. z.B. Goff, 1967; Sherrick & Craig, 1982). Die Standardvibration von 250 Hz wurde mit beiden Beschleunigungen doppelt vorgegeben, um die beiden resultierenden ebenmerklichen Unterschiede vergleichen zu können.

Für die Vorgabe des Vergleichsreizes wurde ein adaptives Verfahren verwendet (Leek, 2001; Treutwein, 1995). Bei dieser Methode wird zunächst eine vorher festgelegte maximale Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz vorgegeben. Antwortet die Versuchsperson richtig, wird das Intervall halbiert. Ist die Antwort nach der Reizvorgabe weiterhin richtig, wird das Differenzintervall wiederum halbiert, ist die Antwort jedoch falsch, wird die Hälfte des Differenzintervalls hinzugerechnet und dieses neue Paar dann vorgegeben. Die Differenz wurde sowohl in absteigender Richtung als auch in aufsteigender Richtung vorgegeben. Auf

Grund technischer Restriktionen konnte nicht bei jeder Standardfrequenz dieselbe maximale Differenz zum Vergleichsreiz und dasselbe kleinste Differenzintervall realisiert werden. Tabelle 4.43 gibt einen Überblick über die Standardfrequenzen, das jeweils zugehörige maximale Differenzintervall zwischen Standard- und Vergleichsreiz, das kleinste Differenzintervall sowie den Bereich der Amplituden, wenn die Beschleunigung der Vergleichsfrequenz konstant gehalten wurde.

TABELLE 4.43. Standardfrequenzen, maximales Differenzintervall, kleinstes Differenzintervall und Bereich der Amplituden bei Konstanthaltung der Beschleunigung des Vergleichsreizes in dem hier durchgeführten Experiment.

Standardfrequenz [Hz]	Maximales Differenzintervall zwischen Standard- und Vergleichsreiz [Hz]	Kleines Differenzintervall zwischen Standard- und Vergleichsreiz [Hz]	Bereich der Amplitude bei Konstanthaltung der Beschleunigung [μm]
100	32	4	205 – 55
150	64	4	128 – 21
200	64	16	31 – 14
250	64	16	27 – 10 (75 m/s ²) 275 – 96 (750 m/s ²)
350	128	32	193 – 42
500	128	32	69 – 24
700	256	32	48 – 10

Wie in der Tabelle 4.43 zu erkennen ist, variierten die Amplituden pro Standardfrequenz beträchtlich, wenn die Beschleunigung konstant gehalten wurde. Andererseits hängt die Detektionsschwelle von Vibrationen stark von der Amplitude ab (s.o.). Die Versuchspersonen wurden instruiert, auf die Geschwindigkeit der Vibrationen zu achten. Falls die Amplitude bei der Frequenzdiskriminierung ebenfalls eine Rolle spielt, sollten sich diese beiden Bedingungen voneinander unterscheiden.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Alter, Geschlecht und Händigkeit der Versuchsperson wurden erfasst. Die Versuchspersonen saßen vor dem Versuchsaufbau und sollten den Zeigefinger ihrer dominanten Hand auf den Beschleunigungsnehmer legen. Es wurde sichergestellt, dass alle Probanden dieselbe Fingerposition einnahmen. Durch Verdeckung der Hand konnten die Versuchspersonen die Vibrationen nicht sehen. Zusätzlich bekamen sie weißes Rauschen über geschlossene Kopfhörer, um die Ergebnisse nicht durch die gute auditive Auflösung in dem getesteten Frequenzbereich zu verfälschen. Die Zimmertemperatur wurde bei 22° Celsius konstant gehalten.

Die Konstanthaltung der Amplitude und der Beschleunigung wurde blockweise variiert und über die Versuchspersonen balanciert. Aus dem vorgegebenen Block wurde eine Standardfrequenz zufällig ausgewählt, ebenfalls wurde durch Zufallszuweisung bestimmt, ob die Vergleichsfrequenz geringer oder höher war als die Standardfrequenz. Als erstes Paar wurde den Versuchspersonen die maximale Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz für eine Dauer von jeweils 500 ms (Interstimulusintervall 500 ms) vorgegeben. Die Versuchspersonen sollten immer angeben, ob die zweite Vibration schneller, langsamer oder

gleich schnell wie die erste war. Wenn die Antwort auf das erste Stimuluspaar falsch war, wurde dies notiert und die entsprechende Standardfrequenz und zugehörige Richtung der Vergleichsfrequenzen zu einem späteren Zeitpunkt im Versuch wieder vorgegeben. Wenn das erste Paar desselben Standardreizes mit der entsprechenden Richtung der Vergleichsreize im Verlauf des Versuchs vier Mal falsch beurteilt wurde, wurde der ebenmerkliche Unterschied als nicht bestimmbar definiert. War die Antwort dagegen richtig, wurde der oben beschriebene adaptive Algorithmus angewendet. Die gesamte adaptive Prozedur wurde so lange wiederholt, bis vier Mal dasselbe Antwortmuster bei jeder Versuchsperson für diesen Standardreiz und die zugehörige Richtung des Vergleichsreizes auftrat. Auf diese Weise wurde der gesamte Block abgearbeitet. Dann wurde der nächste Block (Konstanthaltung der Amplitude bzw. Beschleunigung) vorgegeben und dasselbe Verfahren kam zum Einsatz.

Jeder Standardreiz wurde in jedem Block zwei Mal mit beiden Richtungen der Vergleichsreize vorgegeben (außer 250 Hz in dem Block „Konstanthaltung der Beschleunigung“, da zwei Beschleunigungswerte existierten, wurde diese Frequenz in diesem Block vier Mal vorgegeben, s.o.).

Methode

a) Design

Die abhängige Variable war der ebenmerkliche Unterschied für Frequenzen.

Als unabhängige Variablen dienten die Standardfrequenz (100, 150, 200, 250, 350, 500 und 700 Hz), die Richtung der Vergleichsreize (höher vs. niedriger als die Standardfrequenz) und die konstant gehaltene Dimension der Vibrationen (Amplitude vs. Beschleunigung) [7 x 2 x 2 – Design].

b) Stichprobe

11 Versuchspersonen im Alter von 22 bis 26 Jahren (durchschnittlich 24.00 Jahre, Standardabweichung 1.56 Jahre) nahmen an dem Versuch teil. Drei von ihnen waren Frauen, acht Männer. Alle gaben an, Rechtshänder zu sein.

Ergebnisse

Eine weibliche Versuchsperson wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da der ebenmerkliche Unterschied nur für 100 und 150 Hz bestimmt werden konnte.

Der ebenmerkliche Frequenzunterschied wurde pro Versuchsperson für jede unabhängige Variable als Mittelwert aus entdecktem und nicht detektiertem Frequenzunterschied berechnet. Dazu wurde zu jeder letzten richtig beurteilten Vergleichsfrequenz die Hälfte des kleinsten Differenzintervalls addiert (wenn die Vergleichsfrequenz kleiner als die Standardfrequenz war) bzw. subtrahiert (bei höherer Vergleichs- als Standardfrequenz). Dieser Wert wurde über alle Versuchspersonen gemittelt und in den in Bezug auf den Standardreiz entsprechenden Prozentwert umgerechnet.

Weder Alter noch Geschlecht zeigte eine signifikante Korrelation mit den individuellen Werten für den ebenmerklichen Unterschied für Frequenzen.

Der Gesamtmittelwert für den ebenmerklichen Frequenzunterschied betrug 18% mit einer Standardabweichung von 13% (N = 526).

Tabelle 4.44 gibt die Werte des ebenmerklichen Frequenzunterschieds für jede unabhängige Variable wieder.

TABELLE 4.44. Ebenmerklicher Frequenzunterschied [%] für die unabhängigen Variablen.

Standard- frequenz [Hz]	Konstanthaltung der Amplitude			Konstanthaltung der Beschleunigung		
	absteigend	aufsteigend	gesamt	absteigend	aufsteigend	gesamt
100	15	31	23	10	16	13
150	18	18	18	13	20	17
200	27	22	24	23	19	21
250 (75 m/s ²)				18	21	19
250 (750 m/s ²)				17	13	15
250 (gesamt)	19	21	20	17	18	17
350	21	24	23	17	19	18
500	19	18	19	12	14	13
700	16	16	16	13	14	14

Zunächst wurde überprüft, ob sich die beiden ebenmerklichen Frequenzunterschiede für die verschiedenen konstant gehaltenen Beschleunigungen von 75 m/s² und 750 m/s² beim Standardreiz von 250 Hz unterschieden. Der t-test für abhängige Stichproben über die beiden ebenmerklichen Unterschiede ergab, dass sich diese beiden nicht signifikant voneinander unterscheiden, $t(8) = 1.06$, $p = .322$. Die beiden Bedingungen können also für 250 Hz zusammengefasst werden und es wird angenommen, dass sich die beiden Beschleunigungen auch bei den anderen Frequenzen nicht auf den ebenmerklichen Frequenzunterschied auswirken.

Mittels einer univariaten dreifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde berechnet, ob sich die ebenmerklichen Frequenzunterschiede bezüglich der unabhängigen Variablen Standardfrequenz (7 Stufen), konstant gehaltene Dimension (Amplitude vs. Beschleunigung, 2 Stufen) und Richtung der Vergleichsfrequenz (absteigend vs. aufsteigend, 2 Stufen) unterscheiden. Der Gesamteffekt erwies sich als nicht signifikant, $F(1,1) = 2.96$, $p = .335$. Der ebenmerkliche Unterschied war demnach konstant bei 18% über den gesamten Frequenzbereich, die konstant gehaltene Dimension und die Richtung des Vergleichsreizes, die Abweichungen können durch zufallsbedingte Schwankungen erklärt werden.

Im Gegensatz zur Absolutschwelle von Vibrationen scheint bei der Frequenzdiskrimination die Amplitude keinen Einfluss auszuüben.

Zusätzlich wurde überprüft, ob sich die Anzahl der Iterationen, bis dasselbe Antwortmuster vier Mal erreicht wurde, für die Standardfrequenzen unterschied. Im Mittel waren 4.7 (bei 500 Hz) bis 6.7 (bei 100 Hz) Vorgaben notwendig (Gesamtmittelwert 5.5). Der dafür durchgeführte Kruskal-Wallis-Test mit den sieben Standardfrequenzen als Gruppierungsfaktor ergab, dass sich die Anzahl der Iterationen nicht signifikant über die Standardfrequenzen hinweg unterschied, $\chi^2(6) = 6.00$, $p = .423$.

Weiterhin wurde die Anzahl der „schneller“-„langsamer“-Verwechslungen für jede Standardfrequenz ausgezählt. Es gab durchschnittlich 1.1 Verwechslungen pro Standardreiz (Bereich 0.6 bis 1.6 Verwechslungen). Diese Fehlerart trat also sehr selten auf.

Von den insgesamt 600 individuellen ebenmerklichen Frequenzunterschieden konnten 64 nicht bestimmt werden (vier Mal falsche Antwort bei der Vorgabe des ersten Reizpaares sowohl bei der aufsteigenden als auch bei der absteigenden Bedingung). Von diesen 64 traten 40 bei den Standardfrequenzen 500 und 700 Hz auf, was einer Ausfallquote von 25% ab 500 Hz entspricht. Dieser Unterschied in der Anzahl erwies sich als signifikant, $\chi^2(1) = 4.00$, $p = .046$. Dies kann als Maß für die Interpretierbarkeit von Vibrationen definiert werden und ist ein Anzeichen dafür, dass eine Empfindungsänderung von Vibrationen zwischen 350 und 500 Hz eintritt, in der Informationen wie z.B. deren Frequenz schlechter vom Wahrnehmungsapparat bereitgestellt werden können.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der ebenmerkliche Unterschied unabhängig von den Standardfrequenzen zwischen 100 Hz und 700 Hz und ob die Amplitude oder die Beschleunigung konstant gehalten wurde 18% betrug. Es ist also nicht notwendig, die individuelle subjektive Intensität für jeden Benutzer bei der Entwicklung und Gestaltung von Geräten, die Vibrationen zurückmelden, einzustellen.

4.2.4.2. Bestimmung des ebenmerklichen Unterschied für Frequenz mit dem PHANTOM

Dieses Experiment wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich der im vorangegangenen Abschnitt gefundene ebenmerkliche Unterschied für sinusförmige Vibrationen ändert, wenn andere Stimuluskonfigurationen und ein anderes haptisches Ein-/Ausgabegerät verwendet werden. Zu diesem Zweck wurde das PHANTOM eingesetzt, das kein taktiles Ausgabegerät ist, sondern Kraft- und Richtungsdaten wiedergibt. Es ist möglich, mit diesem Gerät Vibrationen mit einer zeitlichen Frequenz bis 500 Hz mit einer bestimmbaren Ausgabekraft darzustellen (das PHANTOM hat eine Abtastrate von 1000 Hz, nach dem Shannon-Nyquist-Theorem ist damit die Hälfte, also 500 Hz, darstellbar, s. Kap. 3. Technisch bedingte Ungenauigkeiten wurden hier vernachlässigt). In diesem Experiment wurde die Amplitude mit den zwei Stufen 1.0 N und 2.0 N konstant gehalten.

Da Benutzer von Telepräsenzsystemen normalerweise nicht mit Sichtschutz arbeiten, wurde hier eine zusätzliche Variation eingeführt. In einer Bedingung erhielten die Versuchspersonen wie im Experiment mit dem taktilen Ausgabegerät (Vibrationsgenerator) einen Sichtschutz, in der anderen Bedingung nicht.

Es wurde dasselbe adaptive Verfahren wie im Experiment davor eingesetzt. Ebenfalls wurden dieselben Standardvibrationen und dieselben maximalen Differenzintervalle realisiert (s. Tab. 4.43), allerdings konnte nur eine Standardvibration von maximal 500 Hz durch die technischen Beschränkungen des PHANTOMs vorgegeben werden, wobei nur die absteigende Richtung möglich war. Das kleinste Differenzintervall wurde jeweils auf 1 Hz gesetzt, da hier durch das selbst erstellte Softwareprogramm die technischen Restriktionen wegfielen, die bei der analogen Messung im vorangegangenen Experiment auftraten.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen wurden zunächst nach ihrem Alter, Geschlecht und ihrer Händigkeit befragt. Sie sollten den Stylus des PHANTOMs wie einen Stift in ihrer dominanten Hand halten. Es wurde sichergestellt, dass alle Versuchspersonen immer dieselbe Handposition

einnahmen. Die Vibrationen wurden in dieselbe Richtung wie bei dem Aufbau mit dem Vibrationsgenerator vorgegeben, also vertikal. Da das Gerät Kräfte am genauesten in seinem mittleren Arbeitsbereich darstellt, wurde ein kubisches Kraftfenster im mittleren Arbeitsbereich implementiert, in dem sich das Ende des Stylus befinden musste. Wurde dieser virtuelle Arbeitsbereich verlassen, wurde der Durchgang abgebrochen und wiederholt, sobald sich der Stylus wieder in dem vorgegebenen Arbeitsraum befand.

Die Probanden bekamen weißes Rauschen über geschlossene Kopfhörer, um die Antwort nicht durch die zusätzliche auditive Rückmeldung des Gerätes zu verfälschen. Die Zimmertemperatur wurde bei 22° Celsius konstant gehalten. Die Amplitude von 1.0 N bzw. 2.0 N wurde blockweise variiert und über die Versuchspersonen balanciert. Die Variation des Sichtschutzes (ja vs. nein) wurde ebenfalls blockweise balanciert, d.h. alle Versuchspersonen absolvierten den Versuch mit und ohne Sichtschutz. Aus dem vorgegebenen Block wurde wieder per Zufall bestimmt, welche Standardfrequenz ausgewählt und welche Richtung der Vergleichsfrequenzen präsentiert wurden. Wiederum wurde den Versuchspersonen als erstes Paar die maximale Differenz zwischen Standard- und Vergleichsfrequenz für eine Dauer von jeweils 1000 ms (Interstimulusintervall 500 Hz) dargeboten. Die Probanden sollten wieder angeben, ob die zweite Frequenz schneller als, langsamer als oder gleich schnell wie die erste war. Ob zuerst die Standard- oder die Vergleichsfrequenz vorgegeben wurde, wurde ebenfalls zufällig bestimmt. Wenn die Antwort auf das erste Stimuluspaar falsch war, wurde dies wieder notiert und das Paar wurde zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen. Falls dasselbe Paar im Verlauf des Versuchs vier Mal falsch beurteilt wurde, war der ebenmerkliche Unterschied als nicht determinierbar definiert. War die Antwort richtig, kam dasselbe adaptive Verfahren wie im Experiment zuvor zum Einsatz. Die gesamte adaptive Prozedur wurde wiederum so lange wiederholt, bis vier Mal dasselbe Antwortmuster bei jeder Versuchsperson für jeden Standardreiz vorlag. Auf diese Weise wurden beide Blöcke (Amplitude 1.0 N vs. 2.0 N) abgearbeitet.

Die Versuchspersonen erhielten jede Standardfrequenz pro Block zwei Mal (jeweils mit geringeren und höheren Vergleichsfrequenzen), mit jeder der beiden Amplituden und den beiden Sichtschutzbedingungen also insgesamt acht Mal.

Methode

a) Design

Die abhängige Variable war der ebenmerkliche Unterschied für Frequenzen.

Als unabhängige Variablen dienten die Standardfrequenz (100, 150, 200, 250, 350 und 500 Hz), die Richtung der Vergleichsreize (höher vs. niedriger als die Standardfrequenz), die Amplitude (1.0 N vs. 2.0 N) und der Sichtschutz (ja vs. nein) [6 x 2 x 2 x 2 – Design].

b) Stichprobe

Elf Männer und vier Frauen im Alter zwischen 20 und 29 Jahren (mittleres Alter 24.93 Jahre, Standardabweichung 2.37 Jahre) nahmen an dem Experiment teil. Zwölf von ihnen waren Rechtshänder, drei waren Linkshänder.

Ergebnisse

Eine weibliche Versuchsperson wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da bei keiner Standardfrequenz ein ebenmerklicher Unterschied bestimmt werden konnte.

Der ebenmerkliche Frequenzunterschied pro Versuchsperson wurde auf dieselbe Weise berechnet und in Prozentwerte umgewandelt wie im vorangegangenen Experiment.

Alter und Geschlecht der Probanden zeigten keine signifikante Korrelation mit den individuellen ebenmerklichen Frequenzunterschieden.

Der Gesamtmittelwert für den ebenmerklichen Frequenzunterschied betrug 18% mit einer Standardabweichung von 5% (N = 560).

Die ebenmerklichen Frequenzunterschiede für jede unabhängige Variable sind in Tabelle 4.45 aufgelistet.

TABELLE 4.45. Ebenmerklicher Frequenzunterschied [%] für die unabhängigen Variablen. Die Werte für die Bedingung ohne Sichtschutz sind farbig dargestellt.

Standard- frequenz [Hz]	Bedingung mit Sichtschutz / Bedingung ohne Sichtschutz											
	Amplitude 1.0 N						Amplitude 2.0 N					
	absteigend		aufsteigend		gesamt		absteigend		aufsteigend		gesamt	
100	18	18	25	23	21	21	16	18	25	25	20	22
150	16	16	19	16	17	16	16	19	19	15	18	17
200	16	17	19	19	17	18	18	18	15	19	17	19
250	15	19	19	20	17	20	16	15	12	13	14	14
350	21	25	14	10	17	18	16	18	10	11	13	15
500	23	26	-	-	23	26	20	21	-	-	20	21

Mit einer univariaten mehrfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung, der abhängigen Variablen ebenmerklicher Frequenzunterschied in Prozent und den Faktoren Standardfrequenz (100, 150, 200, 250 und 350 Hz), Amplitude (1.0 N vs. 2.0 N), Richtung der Vergleichsfrequenzen (absteigend vs. aufsteigend) und Sichtschutz (ja vs. nein) wurde für den Frequenzbereich von 100 bis 350 Hz der Einfluss der Faktoren auf den ebenmerklichen Frequenzunterschied untersucht. Die Standardfrequenz von 500 Hz wurde zunächst nicht in die Analyse einbezogen, da hier nur der Wert für die absteigende Vergleichsfrequenz vorlag.

Der Gesamteffekt erwies sich als signifikant, $F(1,13) = 202.72$, $\eta^2 = .940$, $p < .000$. Im Detail betrachtet wurde ersichtlich, dass sich die Standardfrequenzen voneinander unterscheiden, $F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(4,52) = 9.24$, $\eta^2 = .415$, $p = .001$. Der Bonferroni-Test als post-hoc-Test ergab, dass sich die Standardfrequenz von 100 Hz von allen anderen unterschied (p zwischen .004 und .042), während diese keine signifikanten Unterschiede aufwiesen (p zwischen .759 und 1.000). Dieser Effekt ist überraschend, da im vorangegangenen Experiment mit dem Vibrationsgenerator kein Unterschied bei der Diskriminationsschwelle für Frequenzen für 100 Hz gefunden wurde. Es könnte sich hier entweder um einen Effekt des Ein-/Ausgabegeräts im niedrigeren Frequenzbereich handeln oder eine systematische Ursache haben. Letztere könnte zustande gekommen sein durch die abnehmende Sensitivität der Pacini-Körperchen in diesem Frequenzbereich nahe der Schwelle oder durch Überlagerung der Sensitivitäten der Pacini- und Meissner-Körperchen, die ebenfalls in diesem Frequenzbereich reagieren (Greenspan & Bolanowski, 1996; England, 1995). Bei einem

Effekt des Ein-/Ausgabegeräts könnte die reine Kraftausgabe des PHANTOMs insofern eine Rolle spielen, dass zusätzlich die Merkel-Zellen als drucksensitive Rezeptoren angesprochen werden und das Ergebnis somit verzerren. Hier ist weitere Forschung notwendig, um diesen abweichenden Effekt der Standardfrequenz von 100 Hz zu ergründen.

Alle anderen Effekte erwiesen sich als nicht signifikant, d.h. weder die Amplitude noch die Richtung der Vergleichsfrequenzen noch der Sichtschutz hatten eine Auswirkung auf den ebenmerklichen Unterschied für Frequenzen.

Bei diesem konnte somit kein visueller Dominanzeffekt bezüglich der haptischen Modalität gefunden werden.

Um eine eventuelle Abweichung bei der Standardfrequenz von 500 Hz feststellen zu können, wurde wiederum eine univariate mehrfaktorielle Varianzanalyse berechnet, um die Effekte der Faktoren Standardfrequenz (100, 150, 200, 250, 350 und 500 Hz), Amplitude (1.0 N vs. 2.0 N) und Sichtschutz (ja vs. nein) auf die abhängige Variable ebenmerklicher Frequenzunterschied zu untersuchen. Dabei wurden nur die absteigenden Vergleichsfrequenzen verglichen, da nur hier die Werte für alle Standardfrequenzen vorlagen. Der Gesamteffekt wurde wieder signifikant, $F(1,13) = 149.19$, $\eta^2 = .920$, $p < .000$. Es zeigte sich auch hier, dass sich die Standardfrequenzen voneinander unterschieden, $F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(5,65) = 3.85$, $\eta^2 = .228$, $p = .024$, wobei sich jedoch die Standardfrequenz von 500 Hz von keiner anderen Standardfrequenz unterschied (p zwischen .231 und 1.000 im Bonferroni-post-hoc-Test). Diese Frequenz darf somit zu den anderen hinzugenommen werden. Alle anderen Effekte erwiesen sich als nicht signifikant, was die oben gefundenen Ergebnisse bestätigt.

Der ebenmerkliche Unterschied für Frequenzen betrug 17% für die Standardfrequenzen von 150 bis 500 Hz mit einer Standardabweichung von 4% ($N = 448$); beim Standardreiz 100 Hz betrug dieser 21% (Standardabweichung 6%, $N = 112$).

Die Anzahl der Iterationen, bis dasselbe Antwortmuster pro Standardreiz vier Mal von den Versuchspersonen geliefert wurde, war sehr gering und betrug pro Standardfrequenz im Mittel zwischen 4.0 bei 200 Hz und 4.2 bei 250 Hz (Gesamtmittelwert 4.1). Hier wurden also keine Unterschiede zwischen den Standardfrequenzen bezüglich der Anzahl der Iterationsschritte gefunden.

Die „schneller“-„langsamer“-Verwechslungen waren ebenfalls sehr gering mit durchschnittlichen Verwechslungen zwischen 0.3 und 0.7 pro Standardfrequenz (Bereich 0.1 bis 0.9 Verwechslungen). Dieser Fehler trat somit noch seltener auf als in dem Experiment mit dem Vibrationsgenerator.

Von den insgesamt 616 individuellen ebenmerklichen Frequenzunterschieden konnten 5 nicht bestimmt werden (vier Mal falsche Antwort bei der Vorgabe des ersten Reizpaares sowohl bei der aufsteigenden als auch bei der absteigenden Bedingung). Diese geringe Anzahl ist vernachlässigbar.

Die geringe Anzahl an Iterationen, der „schneller“-„langsamer“-Verwechslungen sowie der nicht bestimmbar ebenmerklichen Unterschiede spricht dafür, dass die Vibrationen, die mit dem PHANTOM appliziert wurden, deutlicher wahrnehmbar sind als diejenigen, die mit Hilfe des Vibrationsgenerators dargeboten wurden. Die Fehlerquote ist somit wesentlich geringer bei der Applikation von Vibrationen über das PHANTOM als über den

Vibrationsgenerator. Dies könnte entweder an der Ausgabe liegen (Kraftausgabe an der Hand vs. taktile Ausgabe am Finger) oder an der Ausgabeart (Amplitude in μm vs. Beschleunigung im ersten, zwei verschiedene Amplituden in N beim zweiten Experiment) und bedarf weiterer Forschung.

Festzuhalten ist, dass der ebenmerkliche Frequenzunterschied über den Bereich von 150 bis 500 Hz konstant bei 17% unabhängig von den in diesem Experiment realisierten Amplituden (1.0 und 2.0 N) blieb und sich bei der Standardfrequenz von 100 Hz auf 21% erhöhte. Dabei war unerheblich, ob die Probanden das PHANTOM sehen konnten oder nicht. Auch hier ist es also nicht notwendig, die individuelle subjektive Intensität für jeden Benutzer bei der Rückmeldung von Vibrationen über das PHANTOM einzustellen.

Die in beiden Experimenten gefundenen Unterschiedsschwellen für Frequenzen von 17%, 18% bzw. 21% stimmen mit bereits berichteten Ergebnissen aus der Literatur überein, bei denen ein ebenmerklicher Unterschied bei hochfrequenten Vibrationen von 20% angegeben wird, der nicht von der Standardfrequenz abhängt (Craig, 1972; Craig, 1974; Sherrick & Craig, 1982).

Vergleich des ebenmerklichen Frequenzunterschieds erhoben mittels Vibrationsgenerator mit demjenigen erhoben mittels PHANTOM

Mit einer univariaten zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung wurden die Effekte des Messwiederholungsfaktors Standardfrequenz (100, 150, 200, 250, 350 und 500 Hz, für das Experiment mit dem PHANTOM bei letzterer Frequenz nur die Werte mit geringeren Vergleichsfrequenzen) und des Gruppierungsfaktors Experiment (ebenmerklicher Unterschied erhoben mit dem Vibrationsgenerator vs. mit dem PHANTOM) auf den ebenmerklichen Frequenzunterschied untersucht. Dabei wurde beim Versuch mit dem PHANTOM nur die Sichtschutzbedingung herangezogen. Weder die Standardfrequenzen ($F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(5,110) = 1.05$, $\eta^2 = .046$, $p = .379$) noch die beiden Experimentalgruppen ($F(1,22) = 0.28$, $\eta^2 = .013$, $p = .603$) unterschieden sich signifikant voneinander. Der ebenmerkliche Frequenzunterschied war demnach unabhängig vom haptischen Ein-/Ausgabegerät und betrug hier zusammengenommen 19% (Standardabweichung 7%).

4.2.5. Quantisierungsart für Frequenz

Im vorangegangenen Experiment wurde eine Erhöhung des ebenmerklichen Unterschieds bei 100 Hz im Vergleich zu höheren Frequenzen bei der Erfassung der Diskriminationsschwelle mit dem PHANTOM beobachtet. In der Literatur werden für Frequenzen unterhalb 100 Hz jedoch allgemein geringere Unterschiedsschwellen als bei Frequenzen über 100 Hz gefunden. Franzén & Nordmark (1975) berichten hier eine Schwelle von 3%, Mowbray & Gebhard (1957) eine solche von 4%. Mountcastle, Talbot, Sakata & Hyvärinen (1969) sowie Steinmetz, Romo & Mountcastle (1989) berichten Unterschiedsschwellen zwischen 5 und 11% für Frequenzen unter 100 Hz. Solomonow & Conaway (1983) fanden eine solche zwischen 13 und 18%. Eine Schwelle von 10% berichten Rothenberg, Verrillo, Zahorian, Brachman & Bolanowski (1977) sowie LaMotte & Mountcastle (1975), Craig (1972) berichtet eine Schwelle von 14%. Goff (1967) fand eine Unterschiedsschwelle für Frequenzen

unter 100 Hz von 20%, diese war jedoch geringer als ihre gefundene Schwelle für Frequenzen über 100 Hz (35-50%).

Nach dem vorherigen Ergebnis mit dem PHANTOM blieb unklar, ob die Erhöhung der Schwelle hauptsächlich am haptischen Ein-/Ausgabegerät (zusätzliches Ansprechen der druckempfindlichen Merkel-Zellen durch die Kraftausgabe des PHANTOMs) oder am Übergang zwischen den Sensitivitäten der verschiedenen Rezeptortypen (Pacini-Körperchen für hochfrequente, Meissner-Körperchen für niederfrequente Vibrationen; s. Abb. 4.01) lag. Durch die geringe Fehlerquote, die bei der Erfassung des ebenmerklichen Frequenzunterschieds beim PHANTOM im Vergleich zum Vibrationsgenerator gefunden wurde, sind beide Erklärungsansätze denkbar, da dieser Effekt bei dem Versuchsaufbau mit dem Vibrationsgenerator verdeckt worden sein könnte.

Es wurde ein Experiment durchgeführt, um diese Positionen gegeneinander zu testen. Wenn beim PHANTOM die erhöhte Schwelle für 100 Hz durch die Kraftausgabe zustande gekommen ist, sollte sich diese Schwelle bei Frequenzen unter 100 Hz entweder weiter erhöhen oder zumindest konstant bleiben. Falls der Sensitivitätsübergang der beiden Rezeptorarten diesen Effekt verursacht haben, sollten sich bei Frequenzen unter 100 Hz ähnliche Ergebnisse wie in der Literatur beschrieben einstellen, da dann hauptsächlich die Meissner-Körperchen die Frequenzen kodieren und deren hohe Sensitivität gemessen wird (s. z.B. Hollins, 2002).

Den Versuchspersonen wurden über das PHANTOM Frequenzen von 40, 60 und 80 Hz dargeboten, wobei dasselbe adaptive Verfahren wie in den beiden vorangegangenen Experimenten angewendet wurde. Bei 40 Hz betrug die maximale Differenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz 16 Hz, bei den Standardfrequenzen von 60 und 80 Hz war diese jeweils 32 Hz. Die minimale Differenz wurde auf 1 Hz gesetzt. Wieder wurde als abhängige Variable der ebenmerkliche Frequenzunterschied sowohl in absteigender als auch in aufsteigender Richtung gemessen. Die Amplitude wurde konstant auf 1.0 N festgelegt und den Versuchspersonen wurde immer ein Sichtschutz angelegt.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen sollten ihr Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM (fünfstufige Ratingskala von keine bis sehr viel Erfahrung), ob sie in Saiteninstrument spielen und wenn ja, über welche Dauer mit den durchschnittlichen Übungsstunden pro Woche, angeben. Sie sollten wieder den Stylus des PHANTOMs wie einen Stift in ihrer dominanten Hand halten. Die Vibrationen wurden wiederum in vertikale Richtung appliziert. Es wurde sichergestellt, dass alle Probanden dieselbe Handposition einnahmen. Der Arbeitsraum wurde wieder als virtuelles kubisches Kraftfenster implementiert.

Über geschlossene Kopfhörer bekamen die Versuchspersonen rosa Rauschen, um wiederum Verzerrungen über die auditive Rückmeldung auszuschließen.

Jede der drei Standardfrequenzen wurde zwei Mal mit absteigenden und zwei Mal mit aufsteigenden Vergleichsfrequenzen vorgegeben, insgesamt also vier Mal. Die Reihenfolge wurde zufällig variiert, ebenso, ob zuerst die Standard- oder die Vergleichsfrequenz präsentiert wurde. Als erstes Paar wurde die maximale Differenz zwischen Standard- und

Vergleichsreiz (Reizdauer jeweils 1000 ms, Interstimulusintervall 500 ms) dargeboten. Die Versuchspersonen sollten beurteilen, ob die zweite Frequenz schneller als, langsamer als oder gleich schnell wie die erste Frequenz war. Wenn die Antwort bei der Vorgabe der Maximaldifferenz zwischen Standard- und Vergleichsreiz falsch war, wurde dieses Paar wieder zu einem späteren Zeitpunkt aufgerufen. Wenn die Antwort auf dasselbe Paar vier Mal falsch gegeben wurde, wurde dieser ebenmerkliche Unterschied als nicht determinierbar definiert. War die Antwort richtig, wurde dieselbe adaptive Methode wie in den beiden vorangegangenen Unterkapiteln angewandt. Die gesamte Prozedur wurde so lange wiederholt, bis vier Mal dasselbe Antwortmuster bei jeder Versuchsperson für jede Standardfrequenz auftrat.

Methode

a) Design

Abhängige Variable war der ebenmerkliche Unterschied für die Frequenzen. Die unabhängigen Variablen waren die Standardfrequenz (40, 60 und 80 Hz) und die Richtung (absteigend vs. aufsteigend) [3 x 2 – Design].

b) Stichprobe

Es nahmen 33 Personen im Alter von 20 bis 30 Jahren (Mittelwert 25.27 Jahre, Standardabweichung 2.98 Jahre) an diesem Experiment teil. Darunter waren 26 Männer und sieben Frauen und bis auf eine männliche Person alle Rechtshänder. 29 Personen gaben an, keine bis mittlere Erfahrung mit dem PHANTOM zu haben, vier hatten viel bis sehr viel Erfahrung. Vier Probanden spielten ein Saiteninstrument mit einer durchschnittlichen Spieldauer von 4.5 Jahren (Standardabweichung 3.87 Jahre) und durchschnittlich 9.75 Übungsstunden pro Monat.

Ergebnisse

Pro Versuchsperson wurde der ebenmerkliche Frequenzunterschied für jede unabhängige Variable als Mittelwert aus entdecktem und nicht entdecktem Frequenzunterschied berechnet. Dazu wurde wie in den Experimenten zum Quantisierungsintervall zu jeder letzten richtig beurteilten Vergleichsfrequenz die Hälfte des kleinsten Differenzintervalls addiert bzw. subtrahiert. Dieser Wert wurde über alle Versuchspersonen gemittelt und in den in Bezug auf den Standardreiz entsprechenden Prozentwert umgerechnet.

Weder Alter, Geschlecht noch Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM zeigte eine signifikante Korrelation mit den individuellen Werten für den ebenmerklichen Unterschied für Frequenzen. Die anderen demographischen Daten wurden nicht ausgewertet, da zu wenige Fälle (für Händigkeit und Spielen eines Saiteninstruments) vorlagen.

Der Gesamtmittelwert für den ebenmerklichen Frequenzunterschied bei diesen niedrigen Frequenzen betrug 6% mit einer Standardabweichung von 1% (N = 198). Alle ebenmerklichen Unterschiede für Frequenzen waren bestimmbar.

Die deskriptiven Werte für jede Standardfrequenz und jede Richtung sind in Tabelle 4.46 aufgeführt.

TABELLE 4.46. Deskriptive Werte für den ebenmerklichen Frequenzunterschied [%] für die unabhängigen Variablen. Werte in Klammern sind die jeweiligen Standardabweichungen.

Standardfrequenz [Hz]	absteigende Richtung	aufsteigende Richtung	gesamt
40	7% (3%)	9% (2%)	8% (2%)
60	4% (2%)	6% (1%)	5% (1%)
80	4% (1%)	5% (1%)	4.5% (1%)

Mit einer mehrfaktoriellen univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung mit der abhängigen Variable ebenmerklicher Frequenzunterschied und den unabhängigen Variablen Standardfrequenz (40, 60, 80 Hz) und Richtung (absteigend, aufsteigend) als Messwiederholungsfaktoren wurde untersucht, ob diese Faktoren einen Einfluss auf den ebenmerklichen Unterschied für Frequenzen ausübt.

Der Gesamteffekt erwies sich als signifikant, $F(1,32) = 2180.77$, $\eta^2 = .986$, $p < .000$. Dabei unterschieden sich signifikant sowohl die Standardfrequenzen, $F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(2,64) = 87.73$, $\eta^2 = .733$, $p < .000$, als auch die Richtungen, $F(1,32) = 13.69$, $\eta^2 = .300$, $p = .001$, voneinander. Die Wechselwirkung war nicht signifikant, $F_{\text{Greenhouse-Geisser}}(2,64) = 1.35$, $\eta^2 = .040$, $p = .265$.

Bei den Standardfrequenzen unterschieden sich alle drei voneinander, $p < .000$ bzw. $p = .030$ (60 vs. 80 Hz). Die Sensitivität fiel mit abnehmenden Frequenzen leicht ab. Die fehlende Konstanz des ebenmerklichen Unterschieds über den gemessenen Frequenzbereich ist ein Indiz dafür, dass nicht nur die Pacini-Körperchen (bei denen ein konstanter ebenmerklicher Frequenzunterschied für hochfrequente Vibrationen über einen großen Frequenzbereich gefunden wurde), sondern auch die Meissner-Körperchen an der Wahrnehmung beteiligt sind.

Es zeigten sich hier dieselben hohen Sensitivitäten in denselben Wertebereichen, die in der Literatur bereits berichtet wurden. Die im vorangegangenen Experiment gefundene erhöhte Schwelle für 100 Hz scheint also nicht durch die Kraftausgabe beim PHANTOM zustande gekommen zu sein, sondern können eher auf einen Übergang der Rezeptorsensitivitäten in diesem Frequenzbereich zurückgeführt werden.

4.2.6. Wahrnehmungsbasierte Kodierung von Vibration

Vibrationen sind keine einheitlichen Stimuli. Sie bestehen aus einer bestimmten Wellenform, die regelmäßig oder unregelmäßig sein kann, haben eine bestimmte Frequenz, Beschleunigung und Amplitude (Intensität). Zudem können Vibrationen aus verschiedenen überlagerten Schwingungen bestehen, die auch phasenverschoben auftreten können.

Aus den Forschungsergebnissen ist unklar, ob die Pacini-Körperchen neben der Frequenz primär auf die Beschleunigung oder auf die Amplitude reagieren, wenn sie durch sinusförmige Vibrationen erregt werden. Betrachtet man die neuronale Antwort, wenn die Pacini-Körperchen mit sinusförmigen Schwingungen gereizt werden, so folgt der Zusammenhang zwischen der Schwelle und der Frequenz der zweiten Ableitung der Amplitude über die Zeit, was der Beschleunigung entspricht. Daraus wurde gefolgert, dass die Pacini-Körperchen die Beschleunigung von sinusförmigen Vibrationen „berechnen“ und daher die Beschleunigung als Wahrnehmungsparameter enkodieren (Seow, 1988, Burdea, 1996, Schmidt, 1973, Sherrick & Craig, 1982). Andere Forscher hingegen argumentieren

gegen diese Position und führen an, dass die Dämpfungs- und Trägheitseigenschaften des menschlichen Gewebes dazu führen, dass Beschleunigungen nicht mit hoher Präzision weitergeleitet werden können (Greenspan & Bolanowski, 1996) und dass vor allem die Höhe der Amplitude als Wahrnehmungsparameter enkodiert wird (Bensmaïa & Hollins, 2000; Makous, Friedman & Vierck, 1995).

Um erstmalig diese beiden Positionen gegeneinander zu testen und somit die wahrnehmungsbasierte Kodierung von Vibrationen zu untersuchen, wurde ein Experiment durchgeführt. Frequenz, Beschleunigung und Amplitude einer sinusförmigen Schwingung sind immer konfundiert. Nur zwei der drei Parameter sind frei variierbar, der dritte ist dann definitiv bestimmt. Daher wurden Paare von vibrotaktile Stimuli gebildet, die aus reinen, nicht überlagerten Sinuswellen bestanden und die sich entweder nur in ihrer Frequenz (Diagonalen in Tabelle 4.47), in ihrer Amplitude (Spalten in Tabelle 4.47) oder in ihrer Beschleunigung (Zeilen in Tabelle 4.47) entsprachen bzw. (in allen drei Dimensionen) gleich waren. Es wurde der Frequenzbereich von 300 bis 840 Hz gewählt, um sicherzustellen, dass nur die Pacini-Körperchen erregt werden und nicht die Meissner-Körperchen, die ebenfalls auf einen Frequenzbereich von bis zu 200 Hz reagieren (z.B. Kontarinis & Howe, 1995; Bolanowski, Gescheider, Verrillo & Checkosky, 1988).

TABELLE 4.47. Konfigurationen von Frequenz, Amplitude und Beschleunigung der Stimulusvibrationen (Nummerierung der Reize in eckigen Klammern).

Beschleunigung	Amplitude			
	$\pm 12.5\mu\text{m}$	$\pm 17.5\mu\text{m}$	$\pm 25.0\mu\text{m}$	$\pm 35.0\mu\text{m}$
250 m/s ²	500 Hz [1]	425 Hz [2]	355 Hz [3]	300 Hz [4]
350 m/s ²	600 Hz [5]	500 Hz [6]	425 Hz [7]	355 Hz [8]
500 m/s ²	710 Hz [9]	600 Hz [10]	500 Hz [11]	425 Hz [12]
700 m/s ²	840 Hz [13]	710 Hz [14]	600 Hz [15]	500 Hz [16]
	Frequenz			

Aus den Stimuluskonfigurationen in Tabelle 4.47 wurden Paare gleicher Frequenz (jeweils zwei Stimuli aus [3-8], [2-7-12], [1-6-11-16], [5-10-15] oder [9-14], insgesamt 14 Paare), gleicher Amplitude (jeweils zwei Stimuli aus [1-5-9-13], [2-6-10-14], [3-7-11-15] oder [4-8-12-16], insgesamt 24 Paare) und gleicher Beschleunigung (jeweils zwei Stimuli aus [1-2-3-4], [5-6-7-8], [9-10-11-12] oder [13-14-15-16], insgesamt 24 Paare) sowie die zugehörigen Gleich-Paare (gleich in allen drei Dimensionen, insgesamt 46 Paare) gebildet. Bei der Reizpräsentation wurden alle Kombinationen und Reihenfolgen berücksichtigt.

Wenn Vibrationen auf Grund ihrer Beschleunigung kodiert werden, sollten Paare mit derselben Beschleunigung unabhängig von den anderen beiden Parametern häufiger als gleich wahrgenommen werden als Paare mit derselben Amplitude. Werden dagegen Vibrationen nach ihrer Amplitude kodiert, sollte der umgekehrte Effekt eintreten.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Der in Kapitel 4.2.2. beschriebene Standardaufbau mit dem Vibrationsgenerator wurde benutzt.

Zunächst wurden Alter, Geschlecht und Händigkeit der Versuchspersonen protokolliert. Die Probanden saßen vor dem Versuchsaufbau und wurden instruiert, die Spitze ihres Zeigefingers der dominanten Hand auf den Beschleunigungsnehmer zu legen. Es wurde sichergestellt, dass alle Versuchspersonen dieselbe Fingerposition einnahmen. Durch den Vorhang vor dem Holzhäuschen wurde verhindert, dass die Versuchspersonen die Vibrationen sehen konnten, um Verfälschungen durch visuelle Rückmeldung zu verhindern (Klatzky, Lederman & Langseth, 2003; Welch & Warren, 1986). Über geschlossene Kopfhörer bekamen die Probanden weißes Rauschen, da Frequenzen in dem hier benutzten Bereich gut hörbar und auch auditiv gut diskriminierbar sind (Birbaumer & Schmidt, 1996, S. 412). Die Raumtemperatur wurde bei 21° Celsius konstant gehalten.

Zunächst wurde den Versuchspersonen eine Vibration des Paares für eine Dauer von 500 ms appliziert, nach einem Interstimulusintervall von 500 ms, in dem die neue Vibration an der Apparatur eingestellt wurde, bekam die Versuchsperson die zweite Vibration ebenfalls für eine Dauer von 500 ms präsentiert. Jedes Paar wurde zwei Mal dargeboten, wobei die Reihenfolge balanciert wurde. Die insgesamt 216 Paare wurden per Zufallsreihenfolge vorgegeben. Von diesen 216 Paaren waren 124 verschieden, zeigten jedoch eine Übereinstimmung in einem der drei Parameter, 92 Paare waren gleich. Die Versuchspersonen sollten nach jedem Paar „gleich“-„verschieden“-Urteile abgeben.

Methode

a) Design

Die abhängige Variable war die Häufigkeit der „gleich“- bzw. „verschieden“-Urteile. Als unabhängige Variable diente die Konfigurationsbedingung (gleich bezüglich Frequenz, gleich bezüglich Amplitude, gleich bezüglich Beschleunigung vs. gleich bezüglich aller drei Parameter).

b) Stichprobe

30 Probanden im Alter von 20 bis 30 Jahren (Mittelwert 23.87 Jahre, Standardabweichung 2.29 Jahre) nahmen an dem Versuch teil. Neun von ihnen waren weiblich, 21 männlich. 28 gaben an, Rechtshänder zu sein, zwei waren Linkshänder.

Ergebnisse

Für jedes Stimuluspaar wurde die Häufigkeit der „gleich“- und der „verschieden“-Nennungen ausgezählt.

Alter, Geschlecht und Händigkeit korrelierten nicht mit der individuellen Häufigkeit der „gleich“- bzw. „verschieden“-Urteile. Diese waren somit unabhängig von den erhobenen demographischen Parametern.

Über alle Versuchspersonen hinweg wurde die Häufigkeit der „gleich“- und „verschieden“-Nennungen für jede Konfigurationsbedingung ausgezählt. Da sich die Gesamthäufigkeiten pro Konfigurationsbedingung unterscheiden, wurde für jede dieser Bedingungen die bedingte Wahrscheinlichkeit berechnet. Tabelle 4.48 liefert das Ergebnis der Häufigkeitsauszählung sowie die zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeiten.

TABELLE 4.48. Häufigkeit der „gleich“- und „verschieden“-Urteile sowie die korrespondierenden bedingten Wahrscheinlichkeiten P für jede Konfigurationsbedingung über alle Probanden.

Konfiguration des Stimuluspaars	„gleich“-Urteile	„verschieden“-Urteile	Gesamturteile
verschieden, dieselbe Frequenz	533 ($P = .635$)	307 ($P = .365$)	840 ($P = 1.000$)
verschieden, dieselbe Amplitude	472 ($P = .328$)	968 ($P = .672$)	1440 ($P = 1.000$)
verschieden, dieselbe Beschleunigung	287 ($P = .199$)	1153 ($P = .801$)	1440 ($P = 1.000$)
gleich (alle drei Parameter)	2438 ($P = .883$)	322 ($P = .117$)	2760 ($P = 1.000$)

Zunächst wurde überprüft, ob die Reihenfolge der Vorgabe bei jedem verschiedenen Paar, das nur in einem Parameter übereinstimmte, Auswirkungen hatte. $N = 657$ Paare wurden als gleich beurteilt, wenn die niedrigere Frequenz zuerst vorgegeben wurde. Wenn die höhere Frequenz als erste präsentiert wurde, beurteilten die Versuchspersonen $N = 635$ Paare als gleich. Dieser Unterschied erwies sich als nicht signifikant, $\chi^2(1) = 0.375$, $p = .540$. Hier zeigten sich also keine Reihenfolgeeffekte.

Aus Tabelle 4.48 wird ersichtlich, dass die Versuchspersonen Paare, die unterschiedlich waren, jedoch dieselbe Frequenz aufwiesen, am häufigsten als gleich beurteilten, gefolgt von verschieden-Paaren mit derselben Amplitude. Unterschiedliche Paare mit derselben Beschleunigung wurden dagegen eher selten als gleich bewertet.

Für die Berechnung der wahrnehmungsbasierten Kodierung von Vibrationen wurde die Wahrscheinlichkeit der „gleich“-Urteile für die Paare, die gleich waren, als Basisrate betrachtet. Es wurde untersucht, ob die „verschieden“-Urteile für die Paare, die verschieden, aber in einem Parameter gleich waren, von der Basisrate differierten; ob also die Rate der richtig gegebenen Antworten („verschieden“ bei unterschiedlichen Paaren) mit der Basisrate übereinstimmt. Hierfür wurden t-tests für abhängige Stichproben mit den entsprechenden Prozentwerten berechnet.

Stimuluspaare, die unterschiedlich waren, jedoch dieselbe Frequenz aufwiesen, unterschieden sich in ihrer „verschieden“-Rate signifikant von der Basisrate, $t(98) = 8.76$, $p < .000$. Ebenso zeigten unterschiedliche Stimuluspaare mit derselben Amplitude einen signifikanten Unterschied zur Basisrate, $t(98) = 3.67$, $p < .000$.

Die „verschieden“-Rate bei unterschiedlichen Stimuluspaaren mit derselben Beschleunigung unterschied sich jedoch nicht signifikant von der Basisrate, $t(98) = 1.55$, $p = .122$.

Sowohl bei unterschiedlichen Paaren mit derselben Frequenz als auch bei denen mit derselben Amplitude wurden also überzufällig häufig falsche „gleich“-Nennungen abgegeben, wohingegen dies bei unterschiedlichen Paaren mit derselben Beschleunigung nicht der Fall ist. Das bedeutet, dass Vibrationen neben der Frequenz primär durch ihre Amplitude bzw. Intensität und nicht durch ihre Beschleunigung kodiert werden.

4.2.7. Effekte der Quantisierung von vibrotaktilem Daten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzempfinden⁶

In diesem Abschnitt werden die in diesem Kapitel zu der Einstellung von vibrotaktilem Daten gefundenen Ergebnisse in Zusammenhang zur menschlichen Aufgabenleistung und

⁶ Dank geht an Jens Schöpel für die Durchführung der Studie im Rahmen seiner Diplomarbeit.

Präsenzerleben gebracht. Die Hauptfragestellung ist hier, wie sich die Quantisierung von vibrotaktilen Daten auf diese menschlichen Parameter auswirkt. Zum Zweck der Beantwortung dieser Frage wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem das Quantisierungsintervall innerhalb und außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds für Frequenzen variiert wurde. Die Versuchspersonen sollten in mehreren Vergleichen beurteilen, welche Frequenzen schneller, langsamer oder gleich schnell sind. Dabei wurde sowohl die Aufgabenleistung als Zeit bis zur Entscheidung bei dem Vergleich und als Richtigkeit der Entscheidung als auch das Präsenzerleben in Form von Ratingfragen erfasst. Die zu beurteilenden Frequenzen waren entweder gleich, verschieden, aber innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds, oder verschieden und außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds für Frequenzen.

Nachdem der ebenmerkliche Unterschied und die Ergebnisse durch die vorhergehenden Experimente bekannt sind, werden folgende Haupthypothesen bezüglich des Quantisierungsintervalls für hochfrequente vibrotaktile Daten aufgestellt:

- H_{vib1}**: Die Aufgabenleistung ist bei Vergleichsfrequenzen, deren Unterschied innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds liegen, gleich wie bei Vergleichsfrequenzen, die identisch sind.
- H_{vib2}**: Die Aufgabenleistung unterscheidet sich bei deutlich unterschiedlichen Vergleichsfrequenzen von Vergleichsfrequenzen, die entweder gleich sind oder deren Unterschiede innerhalb des ebenmerklichen Frequenzunterschieds liegen.
- H_{vib3}**: Das Präsenzerleben bei gleichen Vergleichsfrequenzen gleicht dem bei verschiedenen Vergleichsfrequenzen, deren Unterschiede innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds liegen.
- H_{vib4}**: Das Präsenzerleben ändert sich bei deutlich unterscheidbaren Vergleichsfrequenzen gegenüber solchen, die gleich sind bzw. deren Unterschiede innerhalb des ebenmerklichen Frequenzunterschieds liegen.
- H_{vib5}**: Bei der Aufgabenleistung und beim Telepräsenzerleben bei den deutlich unterscheidbaren Vergleichsfrequenzen spielt es keine Rolle, in welcher Richtung die Vergleichsfrequenzen liegen, ob diese also schneller oder langsamer als die jeweilige Standardfrequenz sind.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Aufgabe wurde virtuell mit Hilfe des PHANTOMs durchgeführt. Die Versuchspersonen saßen dabei vor dem Bildschirm und sollten den Stylus des PHANTOMs wie einen Stift in ihrer dominanten Hand halten. Um die Aufgabe interessanter zu gestalten, wurde ein Programm mit haptischer Rückmeldung selbst erstellt, bei dem die Versuchspersonen einen „Weg“ finden mussten. Abbildung 4.28 zeigt die graphische Oberfläche des Programms.

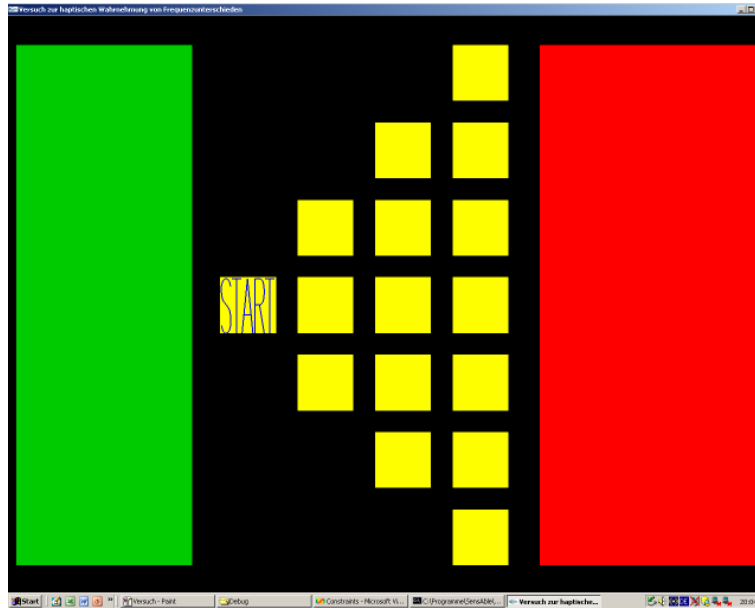


ABBILDUNG 4.28. Graphische Oberfläche des Programms, bei dem die Versuchspersonen den „Weg“ finden sollten.

Das grüne Kästchen diente dabei zur haptischen Orientierung, in welcher Tiefe (von der Versuchsperson aus sagittal) sich die Kästchen befanden. Die gelben Kästchen riefen bei Berührung in der virtuellen Umgebung mit der Spitze des PHANTOMS eine Vibration in sagittaler Richtung hervor. Das Start-Kästchen wurde immer mit einer Frequenz von 200 Hz belegt. Innerhalb jeder Spalte wurden die Kästchen immer mit derselben Vergleichsfrequenz belegt. Diese Vergleichsfrequenz konnte entweder gleich sein wie die Frequenz in der vorhergehenden Spalte oder sich von der Frequenz in der vorhergegangenen Spalte unterscheiden, wobei der Unterschied innerhalb oder außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds liegen konnte. In Bezug zu der vorhergehenden Spalte gab es also immer drei Fälle: gleich, verschieden innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds und verschieden außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds. Die verschiedenen Spalten konnten dabei verschiedene Variationen aufweisen. Die Amplitude der Vibrationen wurde immer konstant auf 1.2 N festgelegt.

Bei jedem Durchgang sollten die Versuchspersonen immer beim Start-Kästchen anfangen und dieses zu Beginn anklicken. Das Kästchen färbte sich dann blau. Dies markierte den Beginn der Zeitmessung. Die Versuchspersonen sollten dann ein Kästchen in der nächsten Spalte berühren, wenn die Frequenz schneller war, sollten sie (wiederum durch Anklicken) das Kästchen oberhalb des Startkästchens markieren, wenn die Frequenz langsamer war, das Kästchen unterhalb, und wenn die Frequenz gleich war wie die des Startkästchens, das Kästchen in derselben Zeile. Durch erneutes Anklicken des Kästchens konnten die Versuchspersonen ihre Entscheidung jederzeit revidieren. Die Abbildung 4.29 zeigt einen Beispielfall, wenn die Person bei der Frequenz in der zweiten Spalte der Meinung war, diese Frequenz sei schneller als die des Startkästchens und sich bei der dritten und vierten Spalte für ein „gleich“-Urteil bezüglich der direkt vorhergehenden Spalte entschieden hat.

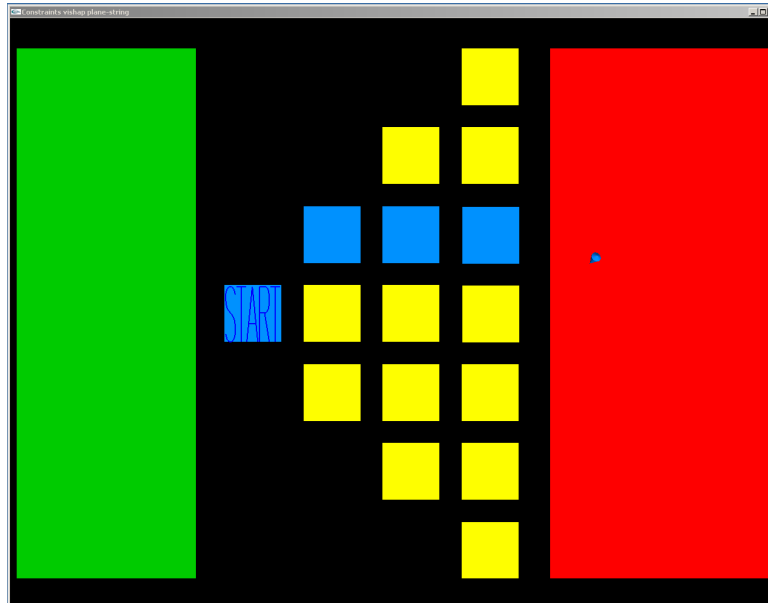


ABBILDUNG 4.29. Beispielfall für einen „Weg“: Die Frequenz in der zweiten Spalte wurde als schneller als beim Startkästchen beurteilt; die Frequenz der dritten Spalte wurde als gleich schnell wie die in der zweiten Spalte eingeschätzt und die Frequenz der vierten Spalte wurde ebenso als gleich schnell wie in der dritten Spalte beurteilt.

Das letzte Anklicken der vierten Spalte durch die Versuchsperson markierte das Ende der Zeitmessung. Die Zeit zwischen dem ersten Anklicken des Startkästchens und dem letzten Anklicken eines Kästchens in der vierten Spalte wurde als die Zeit bis zur Entscheidung definiert.

Wenn die Versuchsperson mit dem Durchgang fertig war, sollte sie das rote Kästchen anklicken. Das Fenster schloss sich und der nächste Durchgang mit neu belegten Frequenzen für die gelben Kästchen wurde gestartet. Nach jedem Durchgang wurden den Versuchspersonen drei Ratingfragen zum Präsenzerleben gestellt. Diese wurden dem Fragebogen von Scheuchensflug (2001) entnommen und lauteten:

- (1) Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr unnatürlich, 7 = sehr natürlich);
- (2) Wie stark trug das, was Sie gespürt haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark);
- (3) Wie stark fühlten Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr wenig, 7 = sehr stark).

Jede Versuchsperson absolvierte 16 Durchgänge, vorher hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit, die Aufgabe an einem Beispiel zu üben.

Da im Unterkapitel 4.2.4.2. der ebenmerkliche Frequenzunterschied bei 18% gefunden wurde, wurde bei den deutlich verschiedenen Frequenzen der Unterschied zur vorangegangenen Spalte sowohl in absteigender als auch in aufsteigender Richtung auf 30% gesetzt. Bei den verschiedenen Frequenzen, die sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds bewegten, wurde die Differenz zur vorhergehenden Spalte sowohl absteigend als auch aufsteigend auf 9% gesetzt.

Unter den Durchgängen befand sich pro Person immer einer, bei der alle Spalten mit derselben Frequenz belegt wurde, einer, bei dem alle Spalten sukzessive mit einer deutlich höheren bzw. niedrigeren Frequenz eingestellt wurden und vier Durchgänge, bei denen die Frequenzunterschiede in den Spalten jeweils unter dem ebenmerklichen Unterschied blieb. Pro Versuchsperson wurden demnach sechs Durchgänge ausgewertet. Bei den übrigen Durchgängen wurden die drei Fälle über die Spalten gemischt dargeboten. Diese dienten dazu, Antworttendenzen der Versuchsperson vorzubeugen, da bei den auszuwertenden Durchgängen das Muster zwischen den verschiedenen Spalten stets gleich blieb. Die Reihenfolge sowie die Position der sechs auszuwertenden Testläufe wurden zufällig zwischen die zehn Durchläufe, die einer Antworttendenz vorbeugen sollten, verteilt.

Zum Abschluss des Versuchs füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM (auf einer Ratingskala von 1 = keine bis 5 = sehr viel), Grad der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen (ebenfalls eine fünfstufige Ratingskala), verbrachte Stunden pro Monat mit Computerspielen mit 3D-Graphik, das Spielen eines Saiteninstruments und wenn ja, über welche Zeitdauer, enthielt. Zusätzlich füllten Sie den Teil des Fragebogens von Scheuchensflug (2001) aus, der die Subskala zur immersiven Tendenz als Persönlichkeitseigenschaft (elf Fragen) umfasste.

Methode

a) Design

Die abhängigen Variablen waren die Zeit bis zur Entscheidung ab dem ersten Anklicken des Startkästchens bis zum letzten Anklicken eines gelben Kästchens in der letzten Spalte, die Richtigkeit der Entscheidung und die drei Präsenzratings.

Die unabhängige Variable war die Kombination, die in drei Stufen vorlag (alle Frequenzen gleich, alle Frequenzen verschieden innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds, alle Frequenzen deutlich verschieden außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds für Frequenzen).

Die deutlich verschiedenen Frequenzen lagen als Gruppierungsfaktoren vor, alle anderen als Messwiederholungsfaktoren.

b) Stichprobe

Es nahmen 24 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 30 Jahren (Durchschnittsalter 24.58 Jahre, Standardabweichung 2.47 Jahre) an diesem Experiment teil. Darunter waren sechs Frauen und 18 Männer. Alle von ihnen waren Rechtshänder. Zehn von ihnen spielten ein Saiteninstrument über eine durchschnittliche Zeitdauer von 0.42 Jahren (Range 2 Monate bis 7 Jahre). Die durchschnittliche Spieldauer mit 3D-Computerspielen pro Monat betrug 18.75 Stunden (Standardabweichung 31.60 Stunden, Range 0 bis 120 Stunden). 15 Probanden gaben an, keine bis mittlere Erfahrung mit virtuellen Umgebungen zu haben, neun hatten viel bis sehr viel Erfahrung. Bei der Erfahrung mit dem PHANTOM hatten 21 keine bis mittlere Erfahrung, drei hatten viel bis sehr viel Erfahrung.

Der Gesamtmittelwert zur immersiven Tendenz (Ratingskala von 1 bis 7, 1 = sehr niedrig, 7 = sehr hoch) war 4.13 mit einer Standardabweichung von 0.90, die individuellen Mittelwerte rangierten von 2.27 bis 6.18.

Ergebnisse

Die Zeit ab dem ersten Anklicken des Startkästchens bis zum letzten Anklicken eines gelben Kästchens in der vierten Spalte in Millisekunden wurde aufgezeichnet. Für jeweils zwei aufeinanderfolgende Spalten wurde die Richtigkeit der Angaben ausgezählt und die Gesamttrichtigkeit pro Durchgang und Kombination als Mittelwert berechnet. Bei den Frequenzen, die innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds differierten, wurde erwartet, dass diese als „gleich“ beurteilt werden. Daher wurde eine „gleich“-Nennung als richtig gewertet. Nur mit dieser Kodierung kann ein eventueller Unterschied zu der Kombination, bei der alle Frequenzen gleich sind, aufgedeckt werden.

Die Präsenzratings wurden direkt aus den Nennungen der Versuchspersonen notiert und zugeordnet.

Die Kombination mit den verschiedenen Frequenzen, die einen Unterschied innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds aufwiesen, kam vier Mal pro Versuchsperson vor, daher wurde für alle unabhängigen Variablen der Mittelwert aus diesen vier Durchgängen gebildet.

Der Gesamtmittelwert für Präsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“) betrug 4.86 (Standardabweichung 1.16, Range der individuellen Werte 2.00 bis 6.33), für Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“) war der Mittelwert 5.12 (Standardabweichung 1.36, Range der individuellen Werte 1.00 bis 6.83) und für Präsenzrating 3 („hineinversetzt“) 4.78 (Standardabweichung 1.25, Range der individuellen Werte 1.00 bis 6.67).

Bezüglich der Aufgabenleistungsmaße war der Gesamtmittelwert für die Zeit bis zur Entscheidung 43.42 s (Standardabweichung 16.98 s, Range der individuellen Werte 18.73 bis 83.40 s) und für die Richtigkeit der Entscheidung 70% (Standardabweichung 16%, Range der individuellen Werte 44 bis 100%).

Es zeigte sich eine Korrelation im unteren Mittelbereich zwischen Geschlecht und Erfahrung mit virtuellen Realitäten, die männlichen Probanden hatten mehr Erfahrung als die weiblichen, $\tau_{\text{Kendall}} = .399$, $p = .034$. Dieser Zusammenhang zeigte sich auch mit den verbrachten Stunden pro Monat mit 3D-Computerspielen, $\tau_{\text{Kendall}} = .419$, $p = .021$. Die Männer dieser Stichprobe scheinen sich also insgesamt mehr mit 3D-Computerspielen und somit auch mit virtuellen Umgebungen zu beschäftigen als die Frauen. Sonst erreichten keine anderen Zusammenhänge der demographischen Daten mit den abhängigen Variablen Signifikanz.

Die drei Präsenzratings wiesen jeweils eine hohe Korrelation zueinander auf, $r_{\text{Spearman}} = .745$, $p < .000$ zwischen Rating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“) und Rating 2 („durch Spüren hineinversetzt“); $r_{\text{Spearman}} = .802$, $p < .000$ zwischen Rating 1 und Rating 3 („hineinversetzt“) und $r_{\text{Spearman}} = .711$, $p < .000$ zwischen Rating 2 und Rating 3. Diese drei Fragen messen demnach dasselbe Konstrukt.

Zwischen der immersiven Tendenz als Persönlichkeitsvariable und den Präsenzratings ergaben sich ebenfalls signifikante Korrelationen, die sich jedoch eher im unteren Mittelbereich befanden. Die immersive Tendenz hatte über die Stichprobe einen Mittelwert

von 4.13 (Standardabweichung 0.90, individueller Range 2.27 bis 6.18). Die immersive Tendenz korrelierte signifikant mit dem Rating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“), $r_{\text{Spearman}} = .319$, $p = .034$ und mit dem Rating 3 („hineinversetzt“), $r_{\text{Spearman}} = .311$, $p = .038$; jedoch nicht signifikant mit dem Rating 2 („durch Spüren hineinversetzt“), $r_{\text{Spearman}} = .262$, $p = .080$. Dies spricht dafür, dass die immersive Tendenz eher einen geringen globalen Zusammenhang zum Präsenzerleben zeigt, sich jedoch nicht speziell auf einzelne Modalitäten wie die haptische Wahrnehmung ausdehnt.

Die Zeit bis zur Entscheidung korrelierte signifikant im mittleren Bereich mit der Richtigkeit der Entscheidung, $r = .429$, $p = .037$. Je länger sich eine Versuchsperson für die Aufgabe Zeit genommen hatte, desto höher war die Wahrscheinlichkeit, eine richtige Entscheidung zu treffen und umgekehrt.

Zwischen den Maßen zur Aufgabenleistung und denjenigen zum Präsenzerleben ergaben sich keine signifikanten Korrelationen, die beiden Maße zeigen in diesem Experiment also keinen Zusammenhang.

Da die Richtung (höhere oder niedrigere Vergleichsfrequenz als jeweilige Standardfrequenz) bei den deutlich verschiedenen Frequenzen speziell zur Überprüfung von H_{vib5} als Gruppierungsfaktor eingeführt wurde, wurde zunächst überprüft, ob sich diese beiden Gruppen voneinander unterscheiden. Dazu wurde eine multivariate einfaktorielle Varianzanalyse mit den abhängigen Variablen Zeit bis zur Entscheidung, Richtigkeit der Entscheidung und den drei Präsenzratings und der unabhängigen Variablen Richtung (absteigend vs. aufsteigend) berechnet. Die beiden Gruppen unterschieden sich nicht signifikant voneinander, demnach wiesen niedrigere Frequenzen bezüglich der abhängigen Variablen dieselben Werte wie die höheren Frequenzen auf, $F(5,18) = 1.16$, $\eta^2 = .244$, $p = .365$ (die multivariate F-Statistik wurde mit dem Pillai-Spur-Kriterium berechnet). Die Hypothese H_{vib5} ist somit bestätigt und die beiden Gruppen wurden zusammengefasst.

Tabelle 4.49 zeigt die deskriptiven Daten für die einzelnen abhängigen Variablen getrennt nach den drei Kombinationen der Vergleichsfrequenz über alle 24 Versuchspersonen.

TABELLE 4.49. Deskriptive Daten der abhängigen Variablen für die Kombinationen der Vergleichsfrequenzen. Werte in Klammern sind die Standardabweichungen.

	gleiche Frequenzen	verschiedene Frequenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds	deutlich verschiedene Frequenzen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds
Zeit bis zur Entscheidung [s]	44.42 (23.70)	55.48 (30.17)	30.53 (12.52)
Richtigkeit der Entscheidung [%]	65 (33)	88 (24)	56 (21)
Präsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	4.96 (1.37)	4.83 (1.14)	4.79 (1.56)
Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	5.08 (1.53)	5.07 (1.35)	5.21 (1.59)
Präsenzrating 3 („hineinversetzt“)	4.75 (1.51)	4.71 (1.30)	4.88 (1.42)

Deskriptiv ist zu erkennen, dass die Zeit bis zur Entscheidung am kürzesten bei den deutlich verschiedenen Frequenzen ist, am längsten bei den verschiedenen Frequenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds. Bei der Richtigkeit der Entscheidung ist diese Beziehung genau umgekehrt. Bei den Präsenzratings sind keine großen Unterschiede zu erkennen.

Für die Überprüfung der übrigen Hypothesen wurde eine multivariate einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung mit denselben abhängigen Variablen wie in der vorangegangenen Analyse und der unabhängigen Variablen Kombination (3 Stufen: gleich, verschieden innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds und deutlich verschieden, zusammengefasst nach absteigend und aufsteigend) durchgeführt. Der multivariate Effekt der Kombination erwies sich als signifikant, $F(10,86) = 2.73$, $\eta^2 = .241$, $p = .006$ (die F-Statistik wurde nach der Pillai-Spur berechnet). Tabelle 4.50 zeigt die univariaten Ergebnisse der einzelnen Faktoren bei der multivariaten Analyse.

TABELLE 4.50. Univariante Haupteffekte des Faktors Kombination.

Quelle	df	F	η^2	p
	innerhalb Vpn			
Zeit bis zur Entscheidung [s]	2	9.95*	.302	< .000
Fehler	46	(382.06)		
Richtigkeit der Entscheidung [%]	2	9.38*	.290	< .000
Fehler	46	(674.07)		
Rating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	2	0.24	.010	.791
Fehler	46	(0.77)		
Rating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)	2	0.25 ^a	.011	.729
Fehler	46	(0.72)		
Rating 3 („hineinversetzt“)	2	0.29	.012	.752
Fehler	46	(0.648)		

Werte in Klammern: Fehlerquadratsummen

a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant ($\alpha = 5\%$)

Wie aus der Tabelle zu erkennen ist, hatte der Faktor Kombination nur Auswirkungen auf die Maße für die Aufgabenleistung, nicht jedoch auf die Präsenzratings. Die Hypothesen H_{Vib3} und H_{Vib4} können somit verworfen werden.

Mittels Bonferroni-Tests als post-hoc-Tests wurden die beiden ersten Hypothesen im Detail geprüft. Bei der Zeit bis zur Entscheidung ergab sich, dass die Zeit für die gleichen Frequenzen nicht von der Zeit für verschiedene Frequenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds differierte ($p = .227$), diese beiden Kombinationen unterschieden sich jedoch von verschiedenen Frequenzen außerhalb des ebenmerklichen Frequenzunterschieds ($p = .040$ bzw. $p = .001$). Dies entspricht den Vorhersagen. Die Richtigkeit der Entscheidung für gleiche Frequenzen unterschied sich ebenfalls nicht von der Richtigkeit für verschiedene Frequenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds ($p = .428$). Bei der Richtigkeit für gleiche Frequenzen konnte auch zu der Richtigkeit bei verschiedenen Frequenzen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds kein signifikanter Unterschied gefunden werden ($p = .060$). Die Richtigkeit für die beiden verschieden-Kombinationen unterschied sich jedoch signifikant voneinander ($p = .001$). Die beiden Hypothesen H_{Vib1} und H_{Vib2} sind demnach größtenteils

bestätigt. Tabelle 4.51 gibt eine kurze Zusammenfassung bezüglich der Bestätigung der Hypothesen.

TABELLE 4.51. Übersicht über die aufgestellten Hypothesen zu Effekten der Quantisierung bei vibrotaktilen Daten.

Hypothesen		Erläuterung
H_{vib1} : Die Aufgabenleistung bei Frequenzen, die sich um weniger als einen ebenmerklichen Unterschied unterscheiden, ist identisch mit der bei zwei gleichen Frequenzen.	bestätigt	Die Zeit bis zur Entscheidung sowie die Richtigkeit der Entscheidung waren bei identischen Frequenzen gleich wie bei Frequenzen, deren Unterschied unter der ebenmerklichen Schwelle lag.
H_{vib2} : Die Aufgabenleistung bei deutlich unterscheidbaren Frequenzen differiert von derjenigen bei gleichen bzw. sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befindlichen Frequenzen.	bestätigt	Die Zeit bis zur Entscheidung war bei deutlich unterscheidbaren Frequenzen im Vergleich zu den gleichen bzw. weniger als ebenmerklich unterschiedlichen Frequenzen verkürzt. Hingegen war die Richtigkeit der Entscheidung prozentual geringer. Diese Effekte waren signifikant.
H_{vib3} : H_{vib1} gilt ebenfalls für das Präsenzerleben.	nicht bestätigt	Die verschiedenen Frequenzkonfigurationen hatten keinen Einfluss auf das Präsenzerleben.
H_{vib4} : H_{vib2} gilt auch beim Präsenzerleben.	nicht bestätigt	
H_{vib5} : Bei der Aufgabenleistung und beim Präsenzerleben ergeben sich bei den deutlich unterscheidbaren Frequenzen keine Effekte der Richtung (langsamere oder schnellere Vergleichsfrequenzen).	bestätigt	Der gesondert eingeführte Gruppierungsfaktor „Richtung der Vergleichsfrequenz“ bei den Vergleichsfrequenzen, die um mehr als einen ebenmerklichen Unterschied differierten, erwies sich als nicht signifikant. Die Richtung hatte also keinen Einfluss auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Zeit bis zur Entscheidung bei Vergleichen von identischen und sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds bewegendenden Frequenzen gegenüber deutlich unterschiedlichen Frequenzen erhöht ist, wobei prozentual mehr richtige Einschätzungen bei gleichen und verschiedenen Frequenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds gegeben werden.

Die Variation der Gleichheit bzw. Verschiedenheit der Frequenzen zeigte keinen Einfluss auf das Präsenzerleben. In dieser Studie konnte ebenfalls kein Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Präsenzerleben aufgedeckt werden.

4.2.8. Zusammenfassung und Gestaltungshinweise

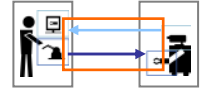
In diesem Kapitel zur Wahrnehmung und Einstellung von vibrotaktilen Daten wurde zunächst untersucht, wie die Abtastfrequenz bei der Rückmeldung von Vibrationen aus einer entfernten oder virtuellen Umgebung eingestellt werden sollte. Es zeigte sich, dass die obere Wahrnehmungsschwelle für Frequenzen bei 1000 bis 1400 Hz liegt. Oberflächentexturen, die eine feine Mikrotextrur aufweisen, können mit einer temporalen Strategie mit einem haptischen Ein-/Ausgabegerät mit Punktkontakt wahrgenommen werden, gröbere Makrotextruren hingegen können mit einer solchen Strategie nicht enkodiert werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Literatur wird empfohlen, die Abtastfrequenz bei

mindestens 1000 Hz einzustellen, wenn hochfrequente vibrotaktile Daten rückgemeldet werden sollen.

Der ebenmerkliche Unterschied für Frequenzen betrug unabhängig vom haptischen Ein-/Ausgabegerät (taktiles Gerät bzw. Gerät mit reiner Krafrückmeldung) 19% über einen weiten Frequenzbereich von 150 bis 700 Hz. Das Quantisierungsintervall kann also dementsprechend eingestellt werden. Bei Frequenzen zwischen 40 und 80 Hz war der ebenmerkliche Frequenzunterschied um mehr als die Hälfte verringert und bewegte sich zwischen 4.5 und 8%, dies ist bei der Quantisierungsart zu berücksichtigen, bei der niederfrequente Vibrationen bis ca. 100 Hz feiner aufgelöst werden sollten als hochfrequente Vibrationen.

Es zeigte sich, dass Vibrationen hauptsächlich nach Frequenz und Amplitude, nicht jedoch nach deren Beschleunigung vom menschlichen Wahrnehmungsapparat enkodiert werden. Bei haptischen Ein-/Ausgabegeräten, bei denen Frequenz und Amplitude nicht unabhängig voneinander variiert werden können, sollte vor allem die Frequenz wirklichkeitstreu rückgemeldet werden.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen des Quantisierungsintervalls auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben konnten die hier gefundenen Ergebnisse zum ebenmerklichen Unterschied in Bezug auf die Aufgabenleistung bestätigt werden. Frequenzen, die unterschiedlich waren, sich jedoch innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds befanden, zeigten dieselbe Aufgabenleistung wie Frequenzen, die gleich waren. Diese beiden Gruppen unterschieden sich in ihrer Aufgabenleistung von Frequenzen, die deutlich unterscheidbar waren. Dabei wurde ein Abgleich zwischen Geschwindigkeit und Richtigkeit der Beurteilung beobachtet. Gleiche und sich innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds bewegend Frequenzen benötigten mehr Zeit bis zur Entscheidung, dafür war die Richtigkeit der Entscheidung prozentual höher. Bei deutlich unterscheidbaren Frequenzen war es genau umgekehrt. Bei Telepräsenzaufgaben, bei denen es wichtig ist, Oberflächentexturen gut unterscheiden zu können (z.B. bei der Exploration), sollte dem Benutzer genügend Zeit für seine Entscheidung zur Verfügung stehen.



4.3. Psychologisch motivierte Kompression haptischer Daten

Nachdem in den letzten beiden Unterkapiteln die Akquisitionsparameter, v.a. die Quantisierung, an Hand der Beispiele Kraft- und Richtungsdaten sowie vibrotaktile Daten behandelt wurden, werden in diesem und dem folgenden Kapitel die Übertragungsparameter betrachtet.

Im Kapitel 3 dieser Arbeit wurde bereits ausgeführt, dass die Kompression von Daten für die Datenübertragung bei Telepräsenz- und Teleaktionen unabdinglich ist. Besonders die Kompression haptischer Daten stellt eine Herausforderung dar, da hohe Paketraten (500 bis 1000 Pakete/s) mit kleinen Paketen zwischen 10 und 50 Byte vorkommen, abhängig von der Anzahl an Freiheitsgraden und der Abtastwertauflösung (Hirche, Buss, Hinterseer & Steinbach, 2005a, 2005b). Häufig werden menschliche Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen benutzt, um Daten verlustbehaftet zu komprimieren. Für haptische Daten stellt dies einen innovativen Ansatz dar. Eine Möglichkeit, den ebenmerklichen Unterschied für Kraftdaten für die Kompression haptischer Daten auszunutzen, wurde als „Deadband“-Ansatz vorgestellt (Hirche, Buss, Hinterseer & Steinbach, 2005a, 2005b; Hinterseer, Steinbach, Hirche & Buss, 2005, Hinterseer & Steinbach, 2006). Dabei werden haptische Kraftdaten aus einer virtuellen oder entfernten Umgebung erst zurückgemeldet, wenn diese den ebenmerklichen Unterschied für Kraft von 10% übersteigen. Die Anwendung dieses Kompressionsverfahrens auf dreidimensionale Kraftdaten in virtueller Umgebung führte zu einer Reduktion der Datenrate um 90%, ohne die Aufgabenleistung des Benutzers zu beeinträchtigen (Hinterseer & Steinbach, 2006).

Eine weitere Datenreduktion konnte durch die Einführung einer linearen Prädiktion in den Algorithmus erreicht werden. Die Prädiktion arbeitet sowohl auf der Eingabe- als auch auf der Ausgabeseite bei Telepräsenz- und Teleaktionssystemen (Hinterseer, Steinbach & Chaudhuri, 2006a). Auf der Eingabeseite werden dabei Kraftdaten an Hand der von der entfernten bzw. virtuellen Umgebung ankommenden Kraftsignale prädiziert. Auf der Teleoperatorseite läuft diese Prädiktion parallel und dieselben Werte wie auf der Operatorseite werden genutzt. So können Kraftdaten erst gesendet werden, wenn das aktuelle Signal von dem prädizierten Signal um mehr als einen ebenmerklichen Unterschied abweicht. Dasselbe Prädiktionsmodell kann auf Geschwindigkeitsdaten angewendet werden, die von der Operatorseite zur Teleoperatorseite geschickt werden.

Bei der Anwendung dieses linearen Prädiktionsmodells wird das Signal auf Grund des Verlaufs der letzten beiden empfangenen Signale geschätzt. Wird der ebenmerkliche Unterschied zwischen aktuellem und vorhergesagtem Signal um mehr als einen ebenmerklichen Unterschied für Kraft überschritten, wird der neue korrekte Wert gesendet und eine neue Prädiktion gestartet (für mehr Details s. Hinterseer, Steinbach & Chaudhuri, 2006a).

Die Anwendung dieser linearen Prädiktion gemeinsam mit dem Deadband-Ansatz in einer virtuellen Umgebung reduzierte die Paketraten um 95%, ohne das Präsenzerleben des Benutzers zu beeinträchtigen (Hinterseer, Steinbach & Chaudhuri, 2006a).

Die alleinige Prädiktion der Daten führte jedoch zu einem Rauschen in den Signalen, das vor allem durch die Berechnungs- und Verarbeitungsschritte bei den

Geschwindigkeitssignalen zustande kam. Aus diesem Grund wurde zur Glättung des Signals und zur akkurateren Prädiktion ein einfacher Kalman-Filter in den Algorithmus implementiert, der auch bei hohen Abtastfrequenzen von 1000 Hz Berechnungen in Echtzeit liefert (Kalman, 1960; Hinterseer, Steinbach & Chaudhuri, 2006b). Die Filtereigenschaften des Kalman-Filters können über einen Parameter R , der Varianz des Messfehlers, eingestellt werden. Ein niedriger Wert von R bedeutet dabei eine hohe Sicherheit, dass die Messungen korrekt sind. Ist $R = 0$, so ist der Filter außer Kraft gesetzt. Bei einem hohen Wert von R hat der Kalman-Filter einen starken Einfluss, die Kontaktinformation aus der entfernten Umgebung wird dadurch „unschärfer“ und die Umgebung scheint für den Benutzer „weicher“ zu sein.

Bei der Anwendung des Kalman-Filter auf haptische Eingabesignale gemeinsam mit der linearen Prädiktion und dem Deadband-Ansatz reduzierte sich die Paketrate in virtueller Umgebung auf bis zu 91% für Geschwindigkeits- und 94% für Kraftsignale, ohne das Präsenzerleben des Benutzers zu beeinträchtigen (Hinterseer, Steinbach & Chaudhuri, 2006b).

Die folgende Abbildung 4.30 zeigt die Signalverarbeitungsschritte, wenn alle drei Algorithmen (Deadband-Ansatz, lineare Prädiktion und Kalman-Filter) angewendet werden.

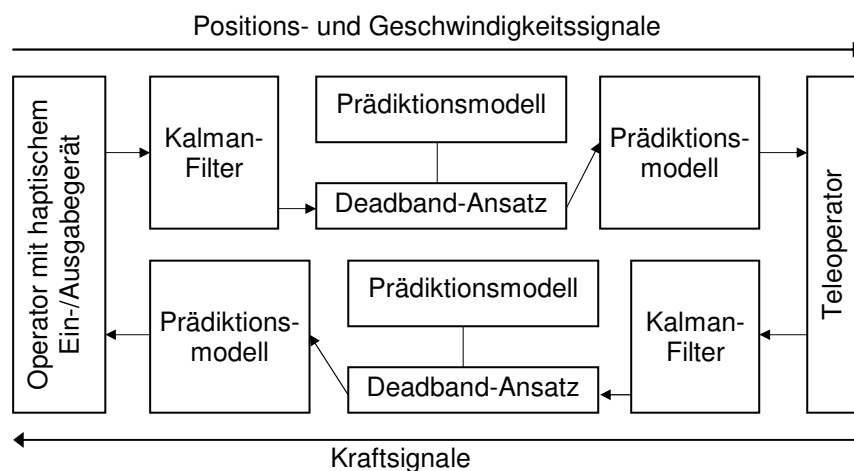


ABBILDUNG 4.30. Signalverarbeitungsfluss vom Operator zum Teleoperator und zurück.

Die Auswirkungen der Anwendung des Deadband-Ansatzes (Rückmeldung von Kraftdaten aus der virtuellen Umgebung erst, wenn diese den ebenmerklichen Unterschied überschreiten) auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben wurden bislang nur für die Rückmeldung von Daten untersucht, deren Differenzen innerhalb der Grenzen des ebenmerklichen Unterschieds lagen. Weiterhin wurden die Effekte der Erweiterungen dieses Ansatzes (lineare Prädiktion, Kalman-Filter) bisher nur bezüglich des Präsenzerlebens betrachtet, nicht bezüglich der Aufgabenleistung (Hinterseer, Steinbach & Chaudhuri, 2006a, 2006b).

Um die Auswirkung der Anwendung der verschiedenen Algorithmen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben zu untersuchen, wurde ein Experiment in virtueller Umgebung durchgeführt, bei dem die haptischen Kraft- und Richtungsdaten unter

Implementierung dieser Algorithmen komprimiert wurden. Dabei wurde eine virtuelle Umgebung über ein Local-Area-Netzwerk über eine 100 Mbit/s LAN-Verbindung mit zwei Computern simuliert. Die Positions- und Geschwindigkeitsdaten vom Operatorrechner wurden zum Teleoperatorrechner geschickt. Dort wurde die haptische Rückmeldung unter Verwendung der beschriebenen Algorithmen berechnet und generiert und in Form von Kraftsignalen an den Operatorrechner zurück übermittelt. Die Signale durchliefen demnach die in Abbildung 4.30 dargestellten Verarbeitungsprozesse. Als Kommunikationssoftware wurde die im Sonderforschungsbereich 453 entwickelte Kommunikationsbibliothek *sfbcomm* verwendet.

Das Experiment wurde speziell durch die Fragestellungen nach den Auswirkungen der beschriebenen Algorithmen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben motiviert. Dazu gehören die Einstellung der Grenze beim Deadband-Ansatz (bisher immer der ebenmerkliche Unterschied für Kraft von 10%), die Verwendung der linearen Prädiktion und die Einstellung des Parameters R des Kalman-Filters.

Als Aufgabe wurde die unter 4.1.2. beschriebene Standardaufgabe des Abfahrens von Trackingbahnen auf einer virtuellen Kugel mit dem PHANTOM verwendet. Die Versuchspersonen sollten dabei vier verschiedene Großkreise auf der Kugel abfahren: den vertikalen Meridian, die Äquatoriallinie, eine Linie, die 45° im Uhrzeigersinn gegenüber die Äquatoriallinie gedreht war oder eine Linie, die 45° gegen den Uhrzeigersinn gegenüber der Äquatoriallinie rotiert war. Dabei wurden sukzessive Stufen des Algorithmus eingeführt. Die Grenze für die Rückmeldung haptischer Kraftdaten beim Deadband-Ansatz wurde jeweils zwischen 0 und 40% in Zehnerschritten variiert. Die Prädiktion wurde in zwei Schritten eingeführt: keine vs. lineare Prädiktion. Der Parameter R des Kalman-Filters kam in den vier Stufen 0 (keine Kalman-Filterung), 50, 100 und 300 zum Einsatz. 50 ist dabei ein niedriger Wert, 300 ist ein sehr hoher Wert für den Parameter. Der Wert 100 zeigte systembezogen das beste Verhältnis zwischen Antwortzeit und Rauschunterdrückung, wurde jedoch noch nicht an Hand psychologischer Parameter validiert⁷.

Folgende fünf sukzessive Kompressionsstufen wurden realisiert:

- Deadband-Ansatz (Grenze zwischen 0 und 40%), keine Prädiktion, $R_{Kalman} = 0$ (Kompressionsschema 1);
- Deadband-Ansatz (Grenze zwischen 0 und 40%), lineare Prädiktion, $R_{Kalman} = 0$ (Kompressionsschema 2);
- Deadband-Ansatz (Grenze zwischen 0 und 40%), lineare Prädiktion, $R_{Kalman} = 50$ (Kompressionsschema 3);
- Deadband-Ansatz (Grenze zwischen 0 und 40%), lineare Prädiktion, $R_{Kalman} = 100$ (Kompressionsschema 4);
- Deadband-Ansatz (Grenze zwischen 0 und 40%), lineare Prädiktion, $R_{Kalman} = 300$ (Kompressionsschema 5).

Insgesamt wurden also 25 Bedingungen (fünf Kompressionsschemata mit jeweils fünf eingestellten Grenzen beim Deadband-Ansatz) bei dem Experiment untersucht.

⁷ Besonderer Dank geht an Peter Hinterseer für die Bereitstellung des Grundprogramms.

Auf Grund der Ergebnisse, die in dem Unterkapitel 4.1. zur Wahrnehmung und Einstellung von Kraft- und Richtungsdaten berichtet wurden, werden folgende Hypothesen aufgestellt:

H_{Komp1}: Da im Unterkapitel 4.1.7. keine Effekte der Quantisierung haptischer Kraft- und Richtungsdaten auf die Aufgabenleistung gefunden wurden, wird auch hier angenommen, dass die eingestellte Grenze beim Deadband-Ansatz keine Auswirkungen auf die Aufgabenleistung zeigt.

H_{Komp2}: Die Quantisierung hatte jedoch einen negativen Einfluss auf das Präsenzerleben, daher werden auch hier negative Effekte bei der Erhöhung der Grenze beim Deadband-Ansatz auf das Präsenzerleben erwartet.

H_{Komp3}: Es zeigen sich Kompensationseffekte durch die lineare Prädiktion und die Einstellung des Parameters R für den Kalman-Filter bezüglich des Präsenzerlebens, v.a. bei einer hoch eingestellten Grenze für den Deadband-Ansatz.

H_{Komp4}: Durch den „Oblique-Effekt“ (s. Kap. 4.1.1.) hat die vertikale Trackingbahn einen Einfluss auf die Aufgabenleistung und führt zum höchsten Präsenzerleben im Vergleich zu horizontalen oder schrägen Abfahrbahnen.

Beim Abfahren der Großkreise auf der Kugeloberfläche wurde die Aufgabenleistung an Hand der Parameter Genauigkeit, Geschwindigkeit und Kontaktkraft erhoben. Das Telepräsenzerleben wurde mittels Ratingfragen erfasst.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen saßen vor dem PHANTOM und wurden instruiert, den Stylus des PHANTOMS wie einen Stift in ihrer dominanten Hand zu halten. Es wurde darauf geachtet, dass alle Probanden dieselbe Handposition einnahmen. In einer virtuellen Umgebung sollten sie jeweils einen der vier Großkreise auf der virtuellen Kugel so schnell und genau wie möglich abfahren, ohne den Kontakt zur Kugeloberfläche zu verlieren. Zur Orientierung wurden zweidimensionale Linien virtuell auf der Kugel dargestellt. Abbildung 4.31 zeigt die vier abzufahrenden Trackingbahnen.

Virtuell wurde dabei immer nur jeweils eine, nämlich die abzufahrende Spur, dargestellt. Zunächst hatten die Probanden die Möglichkeit, sich an das PHANTOM und an die haptische Rückmeldung durch das Betasten der Kugel ohne augmentierte Linien zu gewöhnen. Die Versuchspersonen konnten den Beginn der experimentellen Durchläufe selber bestimmen.

Bei dem Experiment erhielt jede Versuchsperson alle fünf Grenzen des Deadband-Ansatzes (bis 40%) und vier der fünf Kompressionsschemata. Diese wurden anhand einer Kombination ohne Wiederholung ausgewählt, so dass für jedes Kompressionsschema gleich viele Messwerte erhoben wurden. Die Reihenfolge der vier vorgegebenen Kompressionsschemata wurde für jede Versuchsperson vollständig permutiert. Bei jedem Kompressionsschema wurde jede der vier Linien abgefahren. Deren Reihenfolge wurde mit Hilfe eines lateinischen Quadrats vorgegeben, so dass keiner Spur doppelt hintereinander gefolgt wurde. Jede Versuchsperson durchlief somit 80 Durchgänge (5 Grenzen beim Deadband Ansatz x 4 Kompressionsschemata x 4 Trackingbahnen).

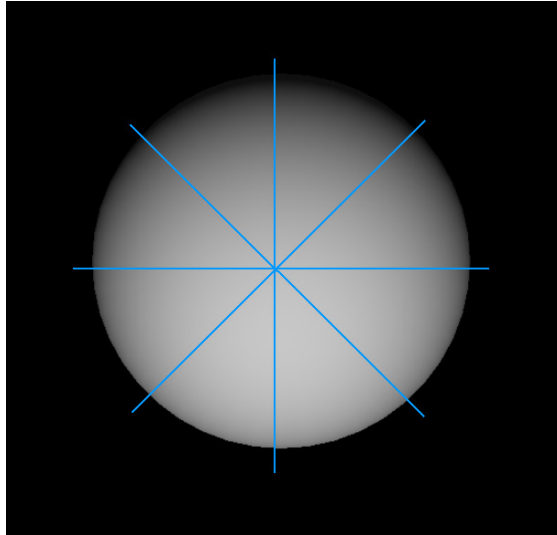


ABBILDUNG 4.31. Abzufahrende Bahnen auf der Kugeloberfläche.

Nach jedem Durchgang wurden den Versuchspersonen zwei Fragen zur Erfassung des Präsenzerlebens gestellt, die aus dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) entnommen wurden. Die zwei Fragen lauteten:

- (1) Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr unnatürlich, 7 = sehr natürlich);
- (2) Wie stark trug das, was Sie gefühlt haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark).

Jeder Durchgang dauerte 20 s, in denen die Versuchspersonen zunächst die Stylusspitze in die Mitte der Kugel positionieren und dann die gezeigte Trackingspur abfahren sollten. Es wurde keine Abfahrriichtung vorgegeben. Alle 100 ms wurde die Position der Stylusspitze in mm in x-, y- und z-Richtung, die Geschwindigkeit in mm/s und die Kontaktkraft in N aufgezeichnet. Am Ende jedes Durchgangs wurde zusätzlich die Anzahl der gesendeten und empfangenen Pakete aufgezeichnet.

Zum Abschluss des Versuchs füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen, Grad der Erfahrung mit dem PHANTOM (jeweils als fünfstufiges Rating von keine bis sehr viel) und verbrachte Stunden im Monat mit Computerspielen mit 3D-Graphik, enthält. Außerdem erhielten sie den Teil des Fragebogens von Scheuchenpflug (2001), der die Subskala zur Messung der immersiven Tendenz als Persönlichkeitsvariable (elf Fragen) enthielt.

Methode

a) Design

Die abhängigen Variablen waren die Abweichung von der Trackingspur in mm, die Abfahrgeschwindigkeit in mm/s, die Kontaktkraft in N sowie die beiden Präsenzratings.

Als unabhängige Variablen dienten die Grenze beim Deadband-Ansatz (5 Stufen: 0%, 10%, 20%, 30% und 40%), das verwendete Kompressionsschema (Schema 1 bis Schema 5) und die vier abzufahrenden Bahnen auf der Kugeloberfläche [5 x 5 x 4 – Design].

b) *Stichprobe*

Insgesamt nahmen 36 Versuchspersonen an dem Experiment teil. Sechs von ihnen mussten von der weiteren Analyse auf Grund technischer Probleme bzw. Abweichungen von der Instruktion ausgeschlossen werden. In der Stichprobe verblieben somit 30 Personen, neun Frauen und 21 Männer im Alter von 22 bis 51 Jahren (mittleres Alter 27.30 Jahre, Standardabweichung 6.55 Jahre). Bis auf eine Person waren alle Rechtshänder. 26 gaben an, keine bis mittlere Erfahrung mit virtuellen Umgebungen zu haben, vier hatten viel bzw. sehr viel Erfahrung. 25 hatten keine bis mittlere Erfahrung mit dem PHANTOM, fünf gaben an, viel oder sehr viel Erfahrung mit diesem Gerät zu haben. Die Anzahl an durchschnittlich verbrachten Stunden im Monat mit 3D-Computerspielen reichte von 0 bis 130 Stunden (Mittelwert 6.03 Stunden, Standardabweichung 23.61 Stunden).

Der Gesamtmittelwert der immersiven Tendenz belief sich auf 4.10 (Standardabweichung 0.76, Bereich der individuellen Mittelwerte von 2.73 bis 5.36).

Ergebnisse

Die ersten fünf Sekunden jedes Durchgangs wurden nicht ausgewertet, um die Positionierung des Stylus des PHANTOMs nicht mitzumessen.

Für die Abweichung von der Solltrajektorie wurde die Differenz zwischen Ist- und Sollbahn (jeweils in Weltkoordinaten) bestimmt. Diese wurde berechnet, indem aus der aktuellen Position die sphärischen Koordinaten θ (Polarwinkel) und φ (Azimutwinkel) berechnet wurden. Daraus wurden die Sollkoordinaten der vorher festgelegten Trackingbahnen ermittelt (der Radius r der Kugel ist bekannt). Die Differenz zur aktuellen Position wurde über die Vektorbeträge bestimmt. Die Abweichung wurde als Mittelwert der absoluten Differenzen berechnet.

Die Geschwindigkeit und die Kontaktkraft wurden jeweils als Mittelwert der aufgezeichneten Geschwindigkeits- bzw. Kraftvektoren ermittelt.

Für die Präsenzratings wurden die jeweiligen Angaben der Versuchspersonen pro Durchgang notiert.

Die Paketraten für die Anzahl der gesendeten und empfangenen Pakete wurden direkt den Aufzeichnungen entnommen.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Die Gesamtabweichung über alle Versuchspersonen betrug 6.34 mm (Standardabweichung 1.86 mm), die Durchschnittsgeschwindigkeit war 118.58 mm/s (Standardabweichung 66.12 mm/s) und die durchschnittliche Kontaktkraft lag bei 1.09 N (Standardabweichung 0.40 N).

Der Mittelwert des Präsenzratings 1 („Natürlichkeit der Interaktion“) belief sich auf 4.29 (Standardabweichung 0.76), der des Präsenzratings 2 („durch Spüren hineinversetzt“) auf 4.37 (Standardabweichung 0.86).

Die Abweichungen bei diesem Experiment waren viel geringer als in dem Experiment in Unterkapitel 4.1.7. mit einer elliptischen Solltrajektorie, dort lag die mittlere Abweichung bei 28.25 mm. Ebenfalls war die Abfahrgeschwindigkeit höher als in dem Experiment mit der Ellipse als Abfahrbahn, dort betrug die Durchschnittsgeschwindigkeit 31.81 mm/s. Insgesamt scheint es viel einfacher zu sein, einer geraden Solltrajektorie als einer Kurve zu folgen.

Tabelle 4.36 liefert eine Übersicht der Mittelwerte der abhängigen Variablen für die Stufen jeder unabhängigen Variablen.

TABELLE 4.36. Mittelwerte der abhängigen Variablen für die Stufen jeder unabhängigen Variablen.

	Kompressionsschema				
	1	2	3	4	5
Abweichung [mm]	6.35	6.51	6.27	6.18	6.38
Geschwindigkeit [mm/s]	122.92	124.07	122.33	108.81	114.79
Kontaktkraft [N]	1.01	1.10	1.16	1.07	1.12
Präsenzrating 1 („Interaktion“)	4.52	4.45	4.38	4.09	4.02
Präsenzrating 2 („hineinversetzt“)	4.71	4.49	4.45	4.11	4.08
	Grenze beim Deadband-Ansatz				
	0%	10%	20%	30%	40%
Abweichung [mm]	6.36	6.41	6.38	6.35	6.20
Geschwindigkeit [mm/s]	121.88	121.22	119.99	115.40	114.43
Kontaktkraft [N]	1.07	1.06	1.06	1.10	1.17
Präsenzrating 1 („Interaktion“)	5.01	4.80	4.34	3.86	3.45
Präsenzrating 2 („hineinversetzt“)	5.11	4.83	4.35	3.95	3.60
	Trackingspur				
	horizontal (-)	vertikal (I)	45° rotiert (/)	-45° rotiert (\)	
Abweichung [mm]	6.85	4.24	6.87	7.39	
Geschwindigkeit [mm/s]	112.72	127.30	113.00	121.32	
Kontaktkraft [N]	1.05	1.20	1.04	1.08	
Präsenzrating 1 („Interaktion“)	4.17	4.47	4.20	4.33	
Präsenzrating 2 („hineinversetzt“)	4.27	4.51	4.30	4.40	

Tendenziell ergaben sich bessere Werte für das Präsenzerleben beim Kompressionsschema 1 als bei den anderen Schemata, die Unterschiede sind jedoch nicht sonderlich hoch. Die Aufgabenleistungsmaße zeigten über die Kompressionsstufen keine hohen Unterschiede.

Bei der Grenze beim Deadband-Ansatz nahm das Präsenzerleben deskriptiv mit zunehmenden Prozentwerten ab. Während die Werte für die Abweichung relativ konstant blieben, nahm die Geschwindigkeit mit der Höhe der Grenze ab und die Kontaktkraft erhöhte sich.

Bei den Trackingspuren erwies sich die vertikale Spur als diejenige mit den höchsten Präsenzratingangaben, der höchsten Kontaktkraft, der höchsten Geschwindigkeit sowie der geringsten Abweichung im Vergleich zu den anderen Bahnen.

Bezüglich der demographischen Daten ergab sich eine Korrelation zwischen Geschlecht und verbrachten Stunden mit 3D-Computerspielen im mittleren Bereich, $\tau_{\text{Kendall}} = .417$, $p = .014$. In dieser Stichprobe verbrachten die männlichen Versuchspersonen mehr Zeit mit diesen Spielen als die weiblichen.

Weiterhin konnten positive mittlere Korrelationen zwischen dem Alter der Probanden und beiden Präsenzratings gefunden werden, $r_{\text{Spearman}} = .495$, $p = .005$ zwischen Alter und Präsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“) und $r_{\text{Spearman}} = .383$, $p = .037$ zwischen Alter und Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“). Je älter die Versuchspersonen waren, desto höher fielen demnach ihre Präsenzratings aus.

Die beiden Präsenzratings korrelierten im oberen Mittelbereich miteinander, $r_{\text{Spearman}} = .655$, $p < .000$. Der Betrag dieser Korrelation indiziert, dass die beiden Fragen etwas unterschiedliche Aspekte desselben Konstrukts messen.

Es ergab sich eine mittlere positive Korrelation zwischen Abweichung und Geschwindigkeit, $r = .423$, $p = .020$. Je höher die Geschwindigkeit war, desto höher war auch die Abweichung. Dieser Effekt ist als „Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleich“ bekannt (z.B. Zelaznik, Monie, McCabe & Thaman, 1988; Bootsma, Marteniuk, MacKenzie & Zaal, 1994; Plamondon & Alimi, 1997).

Ansonsten wurden keine signifikanten Korrelationen gefunden. Auch die immersive Tendenz zeigte keine Korrelationen mit den Präsenzratings, diese wurden somit durch die experimentelle Variation und nicht bedingt durch die Persönlichkeitsvariable abgegeben.

2. Einfluss der unabhängigen Variablen

Um den Einfluss der Kompressionsschemata (Schema 1 bis 5), der Grenze beim Deadband-Ansatz (5 Stufen von 0 bis 40%) und der abzufahrenden Sollbahn (vertikal, horizontal, 45° nach rechts rotiert und 45° nach links rotiert) auf die abhängigen Variablen zu ermitteln, wurde eine multivariate dreifaktorielle Varianzanalyse berechnet. Tabelle 4.37 liefert die multivariaten Ergebnisse der Varianzanalyse (die F-Statistik wurde nach Pillais Spur-Kriterium berechnet).

TABELLE 4.37. Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse.

Quelle	df	F	p
innerhalb Vpn			
Kompressionsschema	4	1.00	.457
Fehler	92	(0.21)	
Grenze bei Deadband-Ansatz	4	4.56*	< .000
Fehler	92	(0.80)	
Trackingbahn	3	7.64*	< .000
Fehler	69	(1.23)	
Schema x Deadband	16	0.44	.999
Fehler	368	(0.09)	
Schema x Trackingbahn	12	0.94	.611
Fehler	276	(0.20)	
Deadband x Trackingbahn	12	0.54	.998
Fehler	276	(0.11)	
Schema x Deadband x Trackingbahn	48	.51	.999
Fehler	1104	(0.11)	

Werte in Klammern: S nach Pillai.

*: signifikant ($\alpha = 5\%$).

Das Kompressionsschema zeigte keine Auswirkungen auf die abhängigen Variablen, ebenso wenig wurden die Interaktionen signifikant, die Hypothese H_{Komp3} , wonach sich

Kompensationseffekte der linearen Prädiktion und des Kalman-Filters bezüglich des Präsenzerlebens ergeben sollten, wird somit verworfen.

Die multivariaten Effekte der Grenze beim Deadband-Ansatz sowie der Trackingspuren erwiesen sich als signifikant. Die univariaten Haupteffekte dieser beiden Faktoren werden in Tabelle 4.38 dargestellt.

TABELLE 4.38. Univariante Haupteffekte der Faktoren Grenze beim Deadband-Ansatz und Trackingbahn.

		Quelle	df	F	p
		innerhalb Vpn			
Grenze beim Deadband.-Ansatz	Abweichung [mm]		4,92	0,99	.419
	Geschwindigkeit [mm/s]		4,92	6,05*	< .000
	Kontaktkraft [N]		4,92	2,41	.055
	Präsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)		4,92	60,23*	< .000
	Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)		4,92	47,50*	< .000
Trackingbahn	Abweichung [mm]		3,69	109,08*	< .000
	Geschwindigkeit [mm/s]		3,69	12,11*	< .000
	Kontaktkraft [N]		3,69	5,81*	.001
	Präsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)		3,69	6,43*	< .000
	Präsenzrating 2 („durch Spüren hineinversetzt“)		3,69	3,77*	.014

*: signifikant ($\alpha = 5\%$).

Wie aus der Tabelle 4.38 ersehen werden kann, hat die Grenze beim Deadband-Ansatz wie vorhergesagt einen Effekt auf das Präsenzempfinden. Die Präsenzratings nehmen mit zunehmendem Unterschied zwischen den rückgemeldeten Kraftsignalen ab. Die Hypothese H_{Komp2} wurde bestätigt. Um das Präsenzerleben nicht zu beeinträchtigen, sollte der ebenmerkliche Unterschied bei der Einstellung der Grenze beim Deadband-Ansatz nicht überschritten werden. Die je nach Anwendungsfall einzusetzenden Grenzen für Kraft- und Richtungsdaten sind Kapitel 4.1. zu entnehmen.

Die Grenze beim Deadband-Ansatz hatte ebenso einen signifikanten Effekt auf die Abfahrgeschwindigkeit. Diese nahm ab, je höher der Unterschied zwischen den rückgemeldeten Kraftsignalen war, je „holpriger“ die Kugeloberfläche also erschien. Da im Unterkapitel 4.1.7. keine Effekte auf die Abfahrgeschwindigkeit gefunden wurden, wurden auch hier keine Effekte erwartet. Die Hypothese H_{Komp1} , wonach sich keine Effekte auf die Aufgabenleistung ergeben sollten, gilt nur in Bezug auf die Abweichung und die Kontaktkraft und konnte damit nur teilweise bestätigt werden. Möglicher Weise wurde eine Auswirkung der Überschreitung des ebenmerklichen Unterschieds im Kapitel 4.1.7. durch die elliptische Solltrajektorie verdeckt und zeigt sich nur bei einfacheren abzufahrenden Bahnen. Dieser Effekt kann hier nicht abschließend geklärt werden.

Die erwarteten Auswirkungen des Faktors Trackingspur konnten bestätigt werden. Bei der vertikalen Bahn waren die Abweichungen geringer, die Abfahrgeschwindigkeit sowie die Kontaktkraft höher als bei den anderen Solltrajektorien. Die vertikale Trackingspur führte ebenfalls zu den höchsten Ratings für das Präsenzerleben. Demnach konnten die Hypothese H_{Komp4} und somit die Auswirkungen des „Oblique-Effekts“ bestätigt werden.

3. Paketrate

Die Paketrate sowohl für die Geschwindigkeits- als auch für die Kraftsignale konnte durch die Einstellung der Grenze und durch die sukzessiven Kompressionsschemata beträchtlich verringert werden. Die Abbildung 4.32 zeigt die Abnahme der Pakete pro Sekunde bezüglich der Geschwindigkeits- und Kraftpakete für die Grenzen beim Deadband-Ansatz und für die Kompressionsschemata in diesem Experiment.

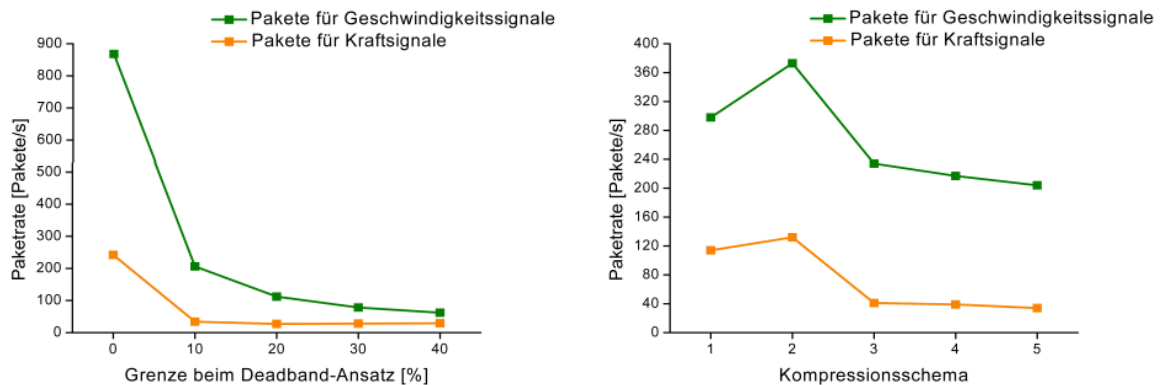


ABBILDUNG 4.32. Paketraten für die Geschwindigkeits- und Kraftpakete bei Stufen bei den Grenzen des Deadband-Ansatzes (links) und der Kompressionsschemata (rechts).

Wie man erkennen kann, führt die Grenze beim Deadband-Ansatz schon bei 10% zu einer beträchtlichen Verringerung der Paketraten. Bei den Kompressionsschemata erhöhte die Einführung der linearen Prädiktion die Paketraten, diese wurde durch die Einstellung des Parameters R des Kalman-Filters wieder verringert. Da keine Auswirkungen dieses Parameters auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben gefunden werden konnten, kann dieser Parameter nur unter Betrachtung der Systemanforderungen angepasst werden.

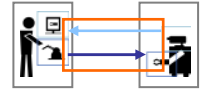
Zu diesem Unterkapitel wurden vier Hypothesen aufgestellt. Tabelle 4.39 gibt eine Übersicht über die Bestätigung der Hypothesen.

TABELLE 4.39. Übersicht über die aufgestellten Hypothesen zur Kompression haptischer Daten und deren Bestätigung.

Hypothesen		Erläuterung
H_{Komp1} : Die eingestellte Deadband-Grenze zeigt keine Auswirkungen auf die Aufgabenleistung.	teilweise bestätigt	Der Unterschied zwischen den rückgemeldeten Kraftdaten hatte eine Auswirkung auf die Abfahrsgeschwindigkeit, diese wurde mit zunehmender Grenze geringer. Es gab keine Auswirkungen der Grenze auf die Abweichung und die Kontaktkraft.
H_{Komp2} : Die eingestellte Deadband-Grenze zeigt negative Auswirkungen auf das Präsenzerleben.	bestätigt	Je höher die Deadband-Grenze war, desto geringer fielen die Präsenzratings und somit das Präsenzerleben aus.

Hypothesen		Erläuterung
H_{Komp3} : Es zeigen sich Kompensationseffekte durch die lineare Prädiktion und die Einstellung des Kalman-Filters bezüglich des Präsenzerlebens (v.a. bei hoher Deadband-Grenze).	nicht bestätigt	Bei den Kompressionsschemata, bei denen die lineare Prädiktion und die Einstellung des Kalman-Filters variiert wurden, konnten weder Haupteffekte noch Interaktionen mit der Deadband-Grenze für das Präsenzerleben gefunden werden.
H_{Komp4} : Es zeigt sich der „Oblique-Effekt“, d.h. die Richtung der Trackingbahnen hat Einfluss auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben. Insgesamt liefert die vertikale abzufahrende Spur die besten Präsenzwerte.	bestätigt	Bei der vertikalen Trackingbahn waren die Abweichungen am geringsten, die Abfahrgeschwindigkeit und die Kontaktkraft am höchsten und es wurden die höchsten Präsenzratings im Vergleich zu den anderen Bahnen abgegeben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kompression haptischer Daten vor allem Auswirkungen auf das Präsenzerleben zeigt, wobei eine deutliche Abnahme erst bei extremen Kompressionsraten ermittelt werden konnte. Der Parameter, der sich dabei am stärksten auswirkte, war die Einstellung des rückgemeldeten Unterschieds bei den Kraft- und Richtungsdaten beim Deadband-Ansatz. Die Grenze sollte innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds eingestellt werden, um das Präsenzerleben nicht in höherem Maße zu beeinträchtigen.



4.4 Auswirkungen von Zeitverzögerungen im Kommunikationskanal auf die menschliche Performanz und das Telepräsenzerleben

In Kommunikationssystemen mit Übertragungskanal wie z.B. bei Telemanipulationssystemen und Internetverbindungen ist eine zeitliche Verzögerung zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen unvermeidlich (MacKenzie & Ware, 1993; Oboe, 2003; Sheridan, 1993; Chang, Kim, Kim, Borm, Lee & Park, 1999, Sheridan, 1992a, S. 212 ff.).

Diese kommen zum einen durch Signalübertragungszeiten durch die begrenzte Lichtgeschwindigkeit zustande, dadurch entsteht selbst bei Local Area Networks (LANs) eine Latenz von 1 bis 2 ms (Chang, Kim, Kim, Borm, Lee & Park, 1999). Bei Übertragungen über das Internet besteht das zusätzliche Problem, dass variable Zeitverzögerungen auftreten, die sich üblicher Weise zwischen 100 und 150 ms bewegen (Oboe, 2003).

Bei Teleoperationen im Weltraum betragen die Signalübertragungsverzögerungen (Round Trip Time, RTT) im niedrigen Orbit mindestens 300 ms, nahe dem Mond 3000 ms. Üblicherweise treten größere Zeitverzögerungen um 6000 ms wegen zusätzlicher Signalverarbeitungsprozesse auf (Sheridan, 1993). Bei Telemanipulationen unter Wasser ist die Signalübertragung über Unterwasserkabel limitiert auf 1700 m/s. Die Kommunikation über 1700 m verursacht eine Zeitverzögerung von insgesamt 2000 ms, so dass es je nach Strecke bis über 10 min Zeitverzögerung kommen kann (Sheridan, 1993).

Wie bereits im Kapitel 3.3. ausgeführt wurde, ist die zeitverzögerte Rückmeldung sensorischer Informationen für die menschliche Wahrnehmung ein unnatürlicher Zustand, der z.T. hohe Leistungseinbußen zur Folge hat (Sheridan, 1993).

Technisch gesehen gibt es verschiedene Arten von Totzeiten, beispielsweise Signalübertragungsverzögerungen durch die Kommunikationsstrecke (wobei manchmal auch unterschieden wird, welcher Teil der Strecke besonders davon betroffen ist) und Systemlatenzen durch die Abtastung, aufwendige Berechnungsschritte usw. (Watson, Walker, Ribarsky & Spaulding, 1998). Für die menschliche Wahrnehmung jedoch ist es unerheblich, worauf die Totzeiten zurückgeführt werden, der Effekt bleibt derselbe, nämlich eine Asynchronie zwischen internen und externen Stimuli.

Um die Effekte von verzögerter Rückmeldung von visuellen und haptischen Daten auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben systematisch zu untersuchen, wurde zunächst theorie- und literaturgeleitet ein psychologisches Modell zu Zeitverzögerungen aufgestellt, das in anschließenden Untersuchungen experimentell überprüft wurde.

4.4.1. Physiologische und Informationsverarbeitungsprozesse

Betrachtet man den Menschen als informationsverarbeitendes System, benötigen verschiedene Prozesse unterschiedliche Aufnahme- und Verarbeitungszeiten, angefangen von der Reizaufnahme durch den Rezeptor, die meist erst ab einer bestimmten Schwelle mittels Summation erfolgt, über die Nervenleitbahnen, beschränkt durch die Nervenleitgeschwindigkeit, bis hin zu höheren kognitiven Prozessen wie Interpretation oder Auswahl der adäquaten Reaktion und schließlich die „Programmierung“ und Ausführung der motorischen Reaktion (Card, Moran & Newell, 1983; Glencross, 1977; Lachman, Lachman & Butterfield, 1979).

Da die menschliche Informationsverarbeitung von der menschlichen Physiologie mitbestimmt und prozess- und somit zeitabhängig ist, muss es einen Bereich von zeitverzögerter Rückmeldung geben, der noch keine Auswirkung auf die menschliche Aufgabenleistung und auf das menschliche Telepräsenzerleben ausübt. Betrachtet man die einzelnen Informationsverarbeitungsprozesse, kann darauf geschlossen werden, in welchem Zeitbereich noch keine Effekte von verzögerter Rückmeldung zu erwarten sind.

Card, Moran & Newell (1983) unterscheiden zwischen perzeptuellem Prozessor, kognitivem Prozessor und motorischem Prozessor. Der perzeptuelle Prozessor ist zuständig für die Informationsentnahme aus der Umwelt und besitzt eine Zykluszeit von durchschnittlich 100 ms [Range 50 ~ 200 ms]. Diese variiert invers mit der Reizintensität. Zudem kann die Zykluszeit darauf abgestimmt werden, ob eher Schnelligkeit oder eher Genauigkeit wichtig ist (Speed-Accuracy-Tradeoff). Der kognitive Prozessor verarbeitet kognitiv die entnommenen Informationen, die vom perzeptuellen Prozessor geliefert werden. Dieser hat eine Zykluszeit von durchschnittlich 70 ms [Range 25 bei automatisierten Aufgaben ~ 170 ms bei komplexeren Reaktionen wie willentliche Reaktionen]. Der motorische Prozessor schließlich liefert die motorische Reaktion als Ergebnis der kognitiven Verarbeitung und besitzt eine Zykluszeit von durchschnittlich 70 ms [Range 30 ms bei Reflexantworten ~ 100 ms für willentliche Bewegungen].

Analog dazu definiert Glencross (1977) Input (Analyse und kurze Speicherung des Reizes), Translation (Verknüpfung von Reiz an Reaktion, d.h. Auswahl des adäquaten Reizes) und Output (motorische Exekution der ausgewählten Reaktion).

Während die ersten beiden Stufen (Input und Translation bei Glencross (1977) bzw. perzeptueller und kognitiver Prozessor bei Card, Moran & Newell (1983)) ein exekutives Kontrollsystem darstellen, das von der sensorischen Rückmeldung abhängig ist (closed-loop-System), ist der letzte Prozess ein open-loop-System in Form eines motorischen Programms. Wenn dies einmal gestartet ist, läuft es unabhängig von sensorischer Rückmeldung ab (Glencross, 1977).

Wenn somit die verzögerte sensorische Rückmeldung während der perzeptuellen und kognitiven Verarbeitung appliziert wird, sollte dies zwar wahrgenommen werden, jedoch noch keine Auswirkung auf die Aufgabenleistung zeigen, da hier das motorische „Programm“ noch angepasst werden kann. Betrachtet man die Zykluszeiten für diese beiden Prozessoren, sollte dieser Zeitbereich für die sensorische verzögerte Rückmeldung, die noch keinen Effekt auf die menschliche Performanz zeigt, durchschnittlich bei 170 ms [Range 75 ~ 370 ms] liegen.

In Übereinstimmung dazu fanden Stark et al. (1987) eine Verarbeitungszeit von 200 ms bei der neurologischen Kontrolle von normalen menschlichen Bewegungen. Sie konnten zeigen, dass die menschliche Performanz bei einer Bahntrackingaufgabe erst ab einer visuellen Zeitverzögerung von 200 ms beeinträchtigt wurde.

Jones & Hunter (1990) stellten bei Bahntrackingaufgaben eine menschliche Reaktionsverzögerung von 165 ms für Kraftausgaben, 268 ms für Positionierungen und 100 ms für propriozeptive Aufgaben fest. Die durchschnittliche Reaktionszeit für Berührungsreize lag bei 130 ms.

Die Reaktionszeit auf Berührungsreize beginnt bei Reflexen ab 30 ms (Wagner & Howe, 2005), bei automatisierten Reaktionen (z.B. Greifkraftregulation, Balance zwischen Greif- und Gewichtskräften) ab 70 ms (Howe, 1992; Johansson & Westling, 1984), bei willentlichen Reaktionen ab 100 bis 130 ms (Wagner & Howe, 2005; Howe, 1992; Jones & Hunter, 1990; England, 1995; Chernikoff & Taylor, 1952; Gibbs, 1965), eine Fehlerreduktion bezüglich der Normalkraft ist erst ab 150 ms möglich (Wagner & Howe, 2005).

Glencross (1977) berichtet eine propriozeptive Reaktionszeit von 120 bis 125 ms bei Aufgaben, die eine Kraftaufwandsveränderung benötigen. Die propriozeptive Reaktionszeit bei Aufgaben, die eine Berichtigung des Kraftaufwands bezüglich der Höhe und der Richtung erfordern, lag bei 60-90 ms unabhängig von der visuellen Rückmeldung. Die Zeit bis zur Wiederholbarkeit von propriozeptiven Reaktionen gibt Glencross mit 300 ms an.

Insgesamt zeigen diese Studien, dass oben hergeleiteter Zeitbereich von durchschnittlich 170 ms als plausibel angenommen werden kann.

Studien zur asynchronen Zeitverzögerung zwischen visuellen und haptischen Daten belegen, dass Zeitverzögerungen wesentlich früher wahrgenommen werden, als diese Effekte auf die Aufgabenleistung zeigen. Boring (1957) gibt an, dass zwei haptische Stimuli als synchron beurteilt werden, wenn sie 27 ms und weniger auseinanderliegen. Bei zwei visuellen Stimuli gibt Boring 43 ms an.

Exner (1875) fand bei einer experimentellen Untersuchung zur Reihfolgenunterscheidung von visuellen und taktilen Reizen eine Unterscheidung bei über 18 ms Latenzzeit.

Ein weiteres Experiment zur intermodalen Simultanerkennung von visuellen und taktilen Reizen konnte diesen Befund replizieren, die Autoren berichten eine synchrone Beurteilung für unter 16 ms Latenzzeit zwischen visuellem und taktilen Reiz (Dinnerstein & Zlogotura, 1968)

Vogels (2004) berichtet bei einem Experiment zur Asynchronie zwischen visuellem und propriozeptivem Stimulus eine Wahrnehmung der Asynchronie ab 43 ms.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass eine Zeitverzögerung von sensorischer Rückmeldung sehr früh wahrgenommen wird (unter 50 ms), eine beeinträchtigende Auswirkung auf die Aufgabenleistung aber erst ab 100 bis 200 ms ersichtlich wird.

4.4.2. Effekte der Zeitverzögerung von visuellen und haptischen Daten auf die Aufgabenleistung

In der Literatur zeigt sich bezüglich des Zusammenhangs zwischen Aufgabenleistung und Zeitverzögerung insgesamt eine Abhängigkeit sowohl von der Aufgabenschwierigkeit als auch vom Aufgabentyp.

Trackingaufgaben sind sensitiver gegenüber Zeitverzögerungen als Platzierungsaufgaben, wohingegen Platzierungsaufgaben sensitiver gegenüber Zeitverzögerungen sind als Greifaufgaben (Watson, Walker, Woytiuk & Ribarsky, 2003). So fanden Watson, Walker, Ribarsky & Spaulding (1998) in virtueller Umgebung mit visuell verzögerter Rückmeldung, dass Platzierungsaufgaben häufigere visuelle Rückmeldung erforderten und gegenüber Zeitverzögerungen sensitiver waren als Greifaufgaben. Aufgaben mit Objektkontakt (constraint motion) scheinen also stärker von Zeitverzögerungen betroffen zu sein als Aufgaben mit freier Bewegung (free-space-motion).

Für die Möglichkeit der Kompensation visuell verzögerter Informationen bei telemanipulativen Aufgaben gibt Sheridan (1993) eine obere Grenze von 1000 ms an. Die Probanden adaptieren häufig ab 1000 ms eine Move-and-Wait-Strategie oder bewegen sich langsamer, wodurch die Bearbeitungszeit zusätzlich verlängert wird. Bei so hohen Zeitverzögerungen wurden häufig auch Frustration und emotionale Belastung bei den Versuchspersonen beobachtet (Sheridan & Ferrell, 1963; Ferrell, 1964; Sheridan, 1993). Durch Krafrückmeldung kann die menschliche Performanz bei visueller Zeitverzögerung verbessert werden. Lathan, Cleary & Traynor (2000) konnten dies für eine Bahntracking-Aufgabe in virtueller Umgebung für visuelle Verzögerungen bis 2000 ms nachweisen. Rosenberg (1993) nutzte überlagerte virtuelle Fixtoren als zusätzliche haptische Rückmeldung (entspricht dem Entlangfahren auf einem virtuellem Lineal) und konnte einen Kompensationseffekt für zeitliche visuelle Verzögerungen bis 450 ms belegen.

Die Kompensation der Zeitverzögerung durch prädiktive Displays erwies sich v.a. nützlich bei visuellen Zeitverzögerungen über 500 ms, langsamen Operatorbewegungen unter 1 Hz, hoher Aufgabenschwierigkeit und Bewegungen im freien Raum (Sheridan, 1993; Stark et al., 1987; Watson, Walker, Woytiuk & Ribarsky, 2003; Bejczy & Kim, 1990).

Nach Sheridan (1993) hat die verzögerte haptische Rückmeldung eine andere quantitative Auswirkung als die verzögerte visuelle Rückmeldung. Insgesamt scheinen hier die maximal möglichen Latenzzeiten kürzer zu sein als bei visueller Zeitverzögerung. Eine haptische Zeitverzögerung kann bis maximal 300 ms vom Menschen kompensiert werden, eine visuelle bis maximal 1000 ms (s. auch Ottensmeyer, Hu, Thompson, Ren & Sheridan, 2000). Die Adaptation einer Move-and-Wait-Strategie ist bei haptisch verzögerter Rückmeldung schwieriger als bei Zeitverzögerungen der visuellen Rückmeldung und wird nur angewandt, wenn die Krafrückmeldung v.a. Positionsfehler aufzeigt. Bei voller visueller Rückmeldung scheint diese zu dominieren und die Effekte der Zeitverzögerung im haptischen Kanal ganz oder teilweise zu kompensieren (Jay & Hubbard, 1994; Jay & Hubbard, 2005; Buzan & Sheridan, 1989; Sheridan, 1993). Auch Ellis (1995) berichtet eine schlechtere Kompensierbarkeit von Zeitverzögerungen im haptischen als im visuellen Bereich.

Der Einsatz von Prädiktordisplays für die Krafrückmeldung hat sich als effektiv erwiesen, um Zeitverzögerungen bei der haptischen Rückmeldung bis zu 3000 ms zu kompensieren (Sheridan, 1993; Wang, Tuer, Rossi, Ni & Shu, 2003; Buzan & Sheridan, 1989). Dabei werden bestimmte Bewegungen prädiziert, also aus den vorangegangenen Bewegungen (Kraft, Geschwindigkeit, Richtung etc.) vorhergesagt.

Verzögerungen bis 1000 ms mit Objektkontakt können mit der Kontrolle der Nachgiebigkeit auf der Slave-Seite kompensiert werden (Sheridan, 1993; Bejczy & Kim, 1990). Bei sehr großen haptischen Zeitverzögerungen sollte eher entweder die haptische Rückmeldung durch Rückmeldungen in den anderen Modalitäten substituiert, also ersetzt (Massimino & Sheridan, 1993; Sheridan, 1993) oder automatisierte Prozesse eingesetzt werden, bei denen der menschliche Operator eine überwachende Funktion einnimmt. Voraussetzung hierfür ist, dass das untergeordnete automatisch arbeitende System zuverlässig ist (Buzan & Sheridan, 1989; Sheridan, 1993). Eine Zeitverzögerung im haptischen Kanal erscheint vom Menschen akzeptierbar, solange diese geringer ist als die benötigte Zeit für die Aufgabenausführung, ein großes Teilstück der Aufgabe von der Verzögerung betroffen ist

und die Störungsbandbreite durch die entfernte Umgebung gering ist, d.h. wenn sich die unvorhergesehenen Aspekte der entfernten Umgebung nicht abrupt ändern (Sheridan, 1993).

Um die Effekte von zeitverzögerter sensorischer Rückmeldung auf die Aufgabenleistung zu untersuchen, wurde eine Reihe von Untersuchungen analysiert. Dabei wurden nur Studien herangezogen, bei denen die Zeitverzögerung variiert, ein Maß für die Aufgabenleistung erhoben und Zahlenwerte für die Zeitverzögerung und die zugehörige menschliche Performanz angegeben wurden.

Für die Untersuchungen zur visuellen Rückmeldung (Asynchronie zwischen interner propriozeptiver und externer visueller Rückmeldung) ist in der Tabelle 4.40 eine Übersicht über die betrachteten Studien nach Autoren, Aufgabe, Aufgabentyp und Ergebnissen dargestellt.

TABELLE 4.40. Übersicht über die analysierten Studien zur visuellen Zeitverzögerung.

Autoren	Aufgabe	Aufgabentyp	Ergebnisse																									
Held, Efstathiou & Greene (1966)	Zwei visuelle Zielreize sollten mit einem Joystick markiert werden, wobei die Versuchspersonen ihre Hand nicht sahen. Die Handbewegungen wurden begrenzt. Es wurden Zeitverzögerungen zwischen Handposition und visueller Rückmeldung eingeführt: 300, 500, 900, 1700 und 3300 ms; Auswahl von 6 aus 24 Vpn.	Place-and-Click	Haupteffekt für Zeitverzögerung: Die Stufen der Zeitverzögerung untereinander unterschieden sich nicht signifikant voneinander, jedoch war die Leistung mit Zeitverzögerung gegenüber fehlender Zeitverzögerung verschlechtert. <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>Leistung [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>300</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td></td> <td>500</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>900</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1700</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3300</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>		Verzögerung [ms]	Leistung [%]		0	1.5		300	0.25		500	0		900	0		1700	0		3300	0				
	Verzögerung [ms]	Leistung [%]																										
	0	1.5																										
	300	0.25																										
	500	0																										
	900	0																										
	1700	0																										
	3300	0																										
MacKenzie & Ware (1993)	Aufgabe war, sich auf einem Bildschirm von links mit der Maus auf ein Ziel rechts im Bildschirm zuzubewegen und darauf zu klicken. Visuelle Zeitverzögerungsstufen: 8.3, 25, 75 und 225 ms. Zugleich wurde die Aufgabenschwierigkeit [Schwierigkeitsindex nach Fitts (1954)] variiert. Dieser Schwierigkeitsindex sagt die benötigte menschliche Bewegungszeit in Abhängigkeit der Distanz und der Größe des Zielobjekts vorher. Erfasst wurden die benötigte Bewegungszeit, die Fehlerrate und die menschliche Bandbreite (Schwierigkeitsindex / Bewegungszeit); 8 Vpn.	Place-and-Click	Zeitverzögerung beeinflusste signifikant alle drei abhängigen Variablen. Es fand sich ein starker multiplikativer Effekt von Aufgabenschwierigkeit und Zeitverzögerung, d.h. mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit nahm der Performanzabfall noch stärker zu. Auch die Ergebnisse von Bryson (1993), Watson, Walker, Woytiuk & Ribarsky (2003) und Ware & Balakrishnan (1994) sprechen dafür, dass die lineare Beziehung zwischen Aufgabenschwierigkeit und Performanz nach Fitts' Gesetz (Fitts, 1954) bei Bahntracking- und Platzieraufgaben mit einer Zeitverzögerung im System von 250 ms nicht mehr gilt. <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="4">Verzögerung [ms]</th> </tr> <tr> <th></th> <th>8.3</th> <th>25</th> <th>75</th> <th>225</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bewegungszeit [ms]</td> <td>911</td> <td>934</td> <td>1059</td> <td>1493</td> </tr> <tr> <td>Fehlerrate [%]</td> <td>3.6</td> <td>3.6</td> <td>4.9</td> <td>11.3</td> </tr> <tr> <td>Bandbreite [bit/s]</td> <td>4.3</td> <td>4.1</td> <td>3.5</td> <td>2.3</td> </tr> </tbody> </table>		Verzögerung [ms]					8.3	25	75	225	Bewegungszeit [ms]	911	934	1059	1493	Fehlerrate [%]	3.6	3.6	4.9	11.3	Bandbreite [bit/s]	4.3	4.1	3.5	2.3
	Verzögerung [ms]																											
	8.3	25	75	225																								
Bewegungszeit [ms]	911	934	1059	1493																								
Fehlerrate [%]	3.6	3.6	4.9	11.3																								
Bandbreite [bit/s]	4.3	4.1	3.5	2.3																								
Sheridan & Ferrell (1963)	Translatorisches Bewegen des Arms zu einer bestimmten Position und Greifen eines Klotzes. Variiert wurden der	Place-and-Grip	Die Zeit bis zur Aufgabenerfüllung (ZBA) stieg mit zunehmendem Schwierigkeitsindex und mit zunehmender Zeitverzögerung an.																									

Autoren	Aufgabe	Aufgabentyp	Ergebnisse										
	Schwierigkeitsindex nach Fitts (1954; s.o.) und die visuelle Zeitverzögerung mit den Stufen 0, 1000, 2100 und 3200 s; 1 geübte Vp.		Es gab eine Interaktion zwischen Schwierigkeitsindex und Zeitverzögerung. Die Versuchsperson adaptierte eine Move-and-Wait-Strategie, wobei die korrekativen Bewegungen unabhängig von der Zeitverzögerung waren. Laut den Autoren besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Zeitverzögerung und Aufgabenleistung.										
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>ZBA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1fach (Referenz)</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>3fach</td> </tr> <tr> <td>2100</td> <td>4.5fach</td> </tr> <tr> <td>3200</td> <td>6fach</td> </tr> </tbody> </table>	Verzögerung [ms]	ZBA	0	1fach (Referenz)	1000	3fach	2100	4.5fach	3200	6fach
Verzögerung [ms]	ZBA												
0	1fach (Referenz)												
1000	3fach												
2100	4.5fach												
3200	6fach												
Thompson (1977)	Telemanipulatives Stecken von Stiften in verschiedene Öffnungen. Die Aufgabenschwierigkeit wurde variiert durch die Öffnungsweite. Zusätzlich wurden visuelle Zeitverzögerungen mit den Stufen 0, 333, 1000 und 3000 ms eingeführt; 6 Vpn.	Peg-Insertion	Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (ZBA) stieg mit zunehmender Schwierigkeit und höherer Zeitverzögerung an.										
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>ZBA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1fach (Referenz)</td> </tr> <tr> <td>333</td> <td>2fach</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>4fach</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>10fach</td> </tr> </tbody> </table>	Verzögerung [ms]	ZBA	0	1fach (Referenz)	333	2fach	1000	4fach	3000	10fach
Verzögerung [ms]	ZBA												
0	1fach (Referenz)												
333	2fach												
1000	4fach												
3000	10fach												

Bezüglich der reinen haptischen Zeitverzögerung gibt es kaum Studien. Meistens werden visuelle und haptische Rückmeldung synchron verzögert dargeboten. In der folgenden Tabelle 4.41 werden Studien zur synchronen haptischen und visuellen Zeitverzögerung analog zur Tabelle 4.40 vorgestellt.

TABELLE 4.41. Übersicht über die analysierten Studien zu haptischer und visueller Zeitverzögerung.

Autoren	Aufgabe	Aufgabentyp	Ergebnisse																				
Hristu, Kontarinis & Howe (1996)	Ein zylindrischer Pflock sollte in ein rechteckiges Loch gesteckt werden, wobei Reibung auftrat, so dass mind. 0.3 N Kraftaufwendung erforderlich waren, um den Pflock in das Loch zu schieben. Dabei wurden die reflektierte Bandbreite der Krafrückmeldung (3-50 Hz) und die Zeitverzögerung (7.4, 9.5, 11.5, 14, 18, 26, 30.5, 48 und 98 ms) variiert; 5 Vpn	Peg-Insertion	Für Zeitverzögerung: signifikant verschlechterte Leistung bzgl. Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (ZBA) für Verzögerungen ab 48 ms; Leistung bzgl. Fehlerraten (zu hohe Greifkraft) verschlechterte sich nicht, sondern blieb über die realisierten Verzögerungsstufen konstant.																				
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>ZBA [ms]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7.4</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>9.5</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>11.5</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>30.5</td> <td>2600</td> </tr> <tr> <td>48</td> <td>2700</td> </tr> <tr> <td>98</td> <td>3200</td> </tr> </tbody> </table>	Verzögerung [ms]	ZBA [ms]	7.4	2600	9.5	2600	11.5	2600	14	2600	18	2600	26	2600	30.5	2600	48	2700	98	3200
Verzögerung [ms]	ZBA [ms]																						
7.4	2600																						
9.5	2600																						
11.5	2600																						
14	2600																						
18	2600																						
26	2600																						
30.5	2600																						
48	2700																						
98	3200																						
Rosenberg (1993)	Mit einem Exoskeleton sollten Stifte unterschiedlicher Größe in ein Brett mit Löchern unterschiedlichen Durchmessers teleoperativ	Peg-Insertion	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (ZBA) verschlechterte sich bei 250 ms Zeitverzögerung um 36 % und bei 450 ms um 44 % gegenüber fehlender Zeitverzögerung.																				

Autoren	Aufgabe	Aufgabentyp	Ergebnisse	
			Verzögerung [ms]	ZBA-Zunahme [%]
	gesteckt werden. Die Zeitverzögerung zwischen Master und Slave wurde variiert mit den Stufen 0, 250 und 450 ms; 6 Vpn		0 250 450	100 136 144
Wang, Tuer, Rossi, Ni & Shu (2003)	Bei einer simulierten Militärübung wurden auf einem Bildschirm Quadrate dargestellt. Wenn mit dem haptischen Eingabegerät darüber gefahren wurde, verwandelten sich die Quadrate haptisch entweder in Rauten („Feind“) oder in Dreiecke („Freund“). Dabei wurden verschiedene Bedingungen eingeführt, u.a. mit haptischem Effekt und ohne Zeitverzögerung, mit haptischem Effekt und 100 ms Zeitverzögerung, mit haptischem Effekt und 100 ms Zeitverzögerung und weißem Rauschen; 1 geübte Vp. Zusätzlich wurde eine Teleaufgabe mit variabler Zeitverzögerung (130-150 ms) realisiert. Hier sollten zwei Versuchspersonen telepräsent den Roboterarm greifen und diesem die Hand schütteln.	Place-and-Click	Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (ZBA) wurde durch Zeitverzögerung und Rauschen verlängert.	
			Verzögerung [ms]	ZBA [ms]
			0 100 100 mit Rauschen	16000 30300 47700
			Mit variabler Zeitverzögerung war das System höchst instabil. Die Versuchspersonen konnten die variablen Zeitverzögerungen von 130 bis 150 ms kaum bzw. nicht kompensieren.	
Jay & Hubbold (2005, 1994)	Zwei Zielblöcke, die sich links und rechts vom Bildschirm befanden, sollten in virtueller Umgebung so schnell und genau wie möglich getroffen werden (virtuelles „Ping-Pong-Spiel“). Beim Berühren des Zielblocks erhielt man Kraftfeedback (äquivalent zum Auftreffen auf eine harte Oberfläche). Die Zeitverzögerung durch das System betrug für haptische Daten 37 ms, für visuelle Daten 44 ms. Variiert wurden die zusätzliche haptische und die zusätzliche visuelle Zeitverzögerung in den Stufen 0, 25, 50, 75 und 150 ms. Effektiv wurden also haptische Verzögerungen von 37, 62, 77, 112 und 187 ms und visuelle Verzögerungen von 44, 69, 94, 119 und 194 ms eingeführt. Zusätzlich wurde die Modalität der Rückmeldung variiert: visuell verzögert und haptisch nicht verzögert; haptisch verzögert und visuell nicht	Place-and-Click	Haupteffekt für Zeitverzögerung auf Zeitabstand (ZA) zwischen den Schlägen und Modalität von verzögerter Rückmeldung: Bei visuell und haptisch verzögerter Rückmeldung verschlechterte sich der Zeitabstand ab 69 ms. Bei visuell verzögerter und haptisch nicht verzögerter Rückmeldung fand eine Verschlechterung des Zeitintervalls ab 94 ms statt. Wenn die Rückmeldung haptisch, jedoch nicht visuell verzögert wurde, verschlechterte sich der Zeitabstand ab 187 ms. Ein Effekt auf die Fehlerrate wurde nur bei visuell verzögerter Rückmeldung gefunden, nicht bei haptisch verzögerter Rückmeldung. Bei der visuell und haptisch verzögerten Bedingung erhöhte sich das Schwierigkeitsrating signifikant ab 94 ms, bei visuell verzögerter und haptisch nicht verzögerter ab 119 ms und bei haptisch verzögerter und visuell nicht verzögerter Rückmeldung fand sich kein Effekt auf die Beurteilung der Aufgabenschwierigkeit.	

Autoren	Aufgabe	Aufgabentyp	Ergebnisse																		
	verzögert; haptisch und visuell verzögert. Als Leistungsmaß wurde der durchschnittliche Zeitabstand zwischen den Schlägen der Zielblöcke erfasst. Nach jeder Aufgabe sollten die Vpn ein fünfstufiges Schwierigkeitsrating abgeben; 6 Vpn.		Verzögerung [ms]	ZA [ms]	ZA [ms]	ZA [ms]															
			vis. hapt.	vis. + hapt.	vis. verzögert	hapt. verzögert															
			37	44	1900	1900															
			62	69	2200*	2100															
			77	94	2650	2550*															
			112	119	2750	2700															
			187	194	3600	3300															
			*signifikante Erhöhung ab dieser Stufe																		
Ferrell (1966)	Mit einem haptischen Ein-/Ausgabegerät wurden verschiedene Aufgabentypen realisiert: Halten von Kontakt ohne Verschieben des Objektes; Ausgleich einer Federkraft, bis die resultierende Kraft null ist. Es wurden Zeitverzögerungen von 0, 300, 1000 und 3000 ms eingeführt. Es wurden zwei zu verwendende Strategien vorgegeben: eine Move-and-Wait-Strategie und eine kontinuierliche Bewegung; 1 Vp, 5 Durchgänge.	Krafttracking	<p>Performanz (Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, ZBA) war mit der Move-and-Wait-Strategie schlechter als mit der kontinuierlichen Bewegung in der Objektkontaktbedingung; in der Federkraftbedingung war es genau umgekehrt. Der Positionierungsfehler war geringer in der Objektkontaktbedingung mit Move-and-Wait-Strategie. Die Move-and-Wait-Strategie ist also vorzuziehen, wenn die Krafrückmeldung Positionierungsfehler anzeigt. Eine kontinuierliche Bewegung sollte dann ausgeführt werden, wenn Objekte gesucht werden und Kontakt zu diesen hergestellt werden soll. Die Zeitverzögerung konnte hier durch verlangsamte Bewegungen kompensiert werden. Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe nahm fast linear mit der Zeitverzögerung zu.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>ZBA [ms] (Kontakt)</th> <th>ZBA [ms] (Federkraft)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1500</td> <td>1700</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>3000</td> <td>3000</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>6000</td> <td>6000</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>16000</td> <td>13000</td> </tr> </tbody> </table>				Verzögerung [ms]	ZBA [ms] (Kontakt)	ZBA [ms] (Federkraft)	0	1500	1700	300	3000	3000	1000	6000	6000	3000	16000	13000
Verzögerung [ms]	ZBA [ms] (Kontakt)	ZBA [ms] (Federkraft)																			
0	1500	1700																			
300	3000	3000																			
1000	6000	6000																			
3000	16000	13000																			
Ottensmeyer, Hu, Thompson, Ren & Sheridan (2000)	Bei mehreren telemanipulativen, kooperativen Chirurgieaufgaben (Greifen, Transferieren, Platzierung von Klemmen, Benutzen von laparoskopischen Scheren) mit einer Vp als Chirurg und sechs anderen Vpn als Assistenten kamen sowohl Manipulations- als auch Beobachtungs- bzw. Supervisionsaufgaben zum Einsatz. Nur der Chirurg bekam die Bedingungen mit der Zeitverzögerung, die Assistenten nicht. Neben asynchronen Verzögerungsbedingungen gab es auch synchrone Verzögerung nur in den kooperativen Aufgaben von haptischen, visuellen und	Kooperative Chirurgieaufgaben mit einem Chirurgen und sechs Assistenten: Greifen und Transferieren; Greifen, Transferieren und Orientierung kontrollieren; Platzierung von Klemmen; Benutzen laparoskopischer Scheren.	<p>Die Zeitverzögerung wirkte sich v.a. auf Manipulationsaufgaben, nicht jedoch auf Beobachtungs- und Supervisionsaufgaben aus. Bei letzterem Aufgabentyp kann die Zeitverzögerung wahrscheinlich noch größer werden, bis sie sich störend auf die menschliche Performanz auswirkt. Der dominante Faktor bei manipulativen Aufgaben scheint in der haptischen Rückmeldung zu liegen, da hier die Leistung, also die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (ZBA) am meisten beeinträchtigt war.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>ZBA (Greifen, Transferieren) [ms]</th> <th>ZBA (Greifen, Transferieren mit Kontrolle der Orientierung) [ms]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>15000</td> <td>20000</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>23000</td> <td>32000</td> </tr> <tr> <td>1200</td> <td>31000</td> <td>43000</td> </tr> </tbody> </table>				Verzögerung [ms]	ZBA (Greifen, Transferieren) [ms]	ZBA (Greifen, Transferieren mit Kontrolle der Orientierung) [ms]	0	15000	20000	600	23000	32000	1200	31000	43000			
Verzögerung [ms]	ZBA (Greifen, Transferieren) [ms]	ZBA (Greifen, Transferieren mit Kontrolle der Orientierung) [ms]																			
0	15000	20000																			
600	23000	32000																			
1200	31000	43000																			

Autoren	Aufgabe	Aufgabentyp	Ergebnisse												
	auditiven Daten mit 0, 600 und 1200 ms Zeitverzögerung. Der Chirurg absolvierte immer eine Aufgabe, die Assistenten zwei Aufgaben. Gemessen wurde die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe.		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Verzögerung [ms]</th> <th>ZBA (Platzierung von Klemmen) [ms]</th> <th>ZBA (Benutzen laparoskopischer Scheren) [ms]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>35000</td> <td>20000</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>92500</td> <td>45000</td> </tr> <tr> <td>1200</td> <td>162500</td> <td>80000</td> </tr> </tbody> </table>	Verzögerung [ms]	ZBA (Platzierung von Klemmen) [ms]	ZBA (Benutzen laparoskopischer Scheren) [ms]	0	35000	20000	600	92500	45000	1200	162500	80000
Verzögerung [ms]	ZBA (Platzierung von Klemmen) [ms]	ZBA (Benutzen laparoskopischer Scheren) [ms]													
0	35000	20000													
600	92500	45000													
1200	162500	80000													
Sharpe (1988)	Die Versuchspersonen sollten mit verbundenen Augen und verschlossenen Ohren mit einer Drahtzange verschiedene Materialien (verschiedene Drahtseile, Kupfer, Eisen, Stahl, Stahldraht etc.) durchschneiden und das Material anschließend identifizieren. Variiert wurden die reflektierte Bandbreite für die Krafrückmeldung und die Zeitverzögerung, wobei hier die Aufgabe war, die Position der Masse zu kontrollieren. Es wurden Zeitverzögerung zwischen 6 und 120 ms realisiert; 6 Vpn.	Identifikation; nur haptische Verzögerung	Die Versuchspersonen bemerkten die Zeitverzögerung, jedoch war der Betrag der Verzögerung, ab der die Leistung abnimmt, nicht zu quantifizieren, da mit zunehmender Zeitverzögerung die Intensität der Krafrückmeldung abnahm (Konfundierung). Insgesamt war hier schon ein Leistungsabfall ab 9 ms Zeitverzögerung erkennbar, wobei nicht klar ist, ob dies nicht auch an der schlechteren Krafrückmeldung lag.												

Unter Verwendung der Zahlenwerte der in den Tabellen 4.40 und 4.41 analysierten Studien wurde mittels Kurvenanpassung mit statistischer Regression der funktionelle Zusammenhang zwischen Zeitverzögerung und Aufgabenleistungsabfall berechnet, wobei die Funktionen mit der höchsten Wahrscheinlichkeit herangezogen wurden. Die Zeitverzögerung fungierte dabei als abhängige, das Maß für die Aufgabenleistung als unabhängige Variable. Als konstanter Term wurde jeweils das Aufgabenmaß der Nullbedingung, also ohne Zeitverzögerung, eingesetzt, da dies der Grundperformanz entspricht. Zudem wurden die Funktionen auf Prozent normiert, die Aufgabenleistung ohne Zeitverzögerung entspricht dann also 100%. Tabelle 4.42 liefert einen Überblick über den so berechneten funktionellen Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Zeitverzögerung für die bearbeiteten Studien.

TABELLE 4.42. Funktioneller Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Zeitverzögerung bei den analysierten Studien.

Autoren	Aufgabentyp und Verzögerungsstufen	Funktioneller Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung (AL in %) und Zeitverzögerung (ZV in ms) (R ² als Maß für die Anpassungsgüte der Funktion an die Daten)
Zeitverzögerung im visuellen Kanal		
Held, Efstathiou & Greene (1966)	Place-and-Click 0, 300, 500, 900, 1700, 3300 ms	<p><u>Handabweichung [%]:</u></p> $AL = \begin{cases} 100 - 0.392 \cdot ZV + 0.0004 \cdot ZV^2; & 0 \leq ZV \leq 500\text{ms} \\ 0; & ZV > 500\text{ms} \end{cases}$ <p>(R² = 1.000)</p> <p>→ quadratischer Zusammenhang</p>

Autoren	Aufgabentyp und Verzögerungsstufen	Funktioneller Zusammenhang zwischen Aufgaben-leistung (AL in %) und Zeitverzögerung (ZV in ms) (R ² als Maß für die Anpassungsgüte der Funktion an die Daten)
MacKenzie & Ware (1993)	Place-and-Click 8.3, 25, 75, 225 ms	<u>Bewegungszeit [ms]:</u> $AL = 100 + 0.161 \cdot ZV + 0.001 \cdot ZV^2$ (R ² = .998) → quadratischer Zusammenhang
		<u>Fehlerrate [%]:</u> $AL = 100 + 0.179 \cdot ZV + 0.003 \cdot ZV^2$ (R ² = .998) → quadratischer Zusammenhang
Sheridan & Ferrell (1963)	Place-and-Grip 0, 1000, 2100, 3200 ms	<u>Zeit bis zur Aufgabenerfüllung:</u> $AL = 100 + 0.162 \cdot ZV$ (R ² = .986) → linearer Zusammenhang
Thompson (1977)	Peg-Insertion 0, 333, 1000, 3000 ms	<u>Zeit bis zur Aufgabenerfüllung:</u> $AL = 100 + 0.300 \cdot ZV$ (R ² = 1.000) → linearer Zusammenhang
Zeitverzögerung im haptischen und visuellen Kanal		
Hristu, Kontarinis & Howe (1996)	Peg-Insertion 7.4, 9.5, 11.5, 14, 18, 26, 30.5, 48, 98 ms	<u>Zeit bis zur Aufgabenerfüllung [ms]:</u> $AL = 100 - 0.069 \cdot ZV + 0.003 \cdot ZV^2$ (R ² = .997) → quadratischer Zusammenhang
Rosenberg (1993)	Peg-Insertion 0, 250, 450 ms	<u>Zunahme der Zeit bis zur Aufgabenerfüllung [%]:</u> $AL = 100 + 0.202 \cdot ZV - 0.0002 \cdot ZV^2$ (R ² = 1.000) → quadratischer Zusammenhang
Wang, Tuer, Rossi, Ni & Shu (2003)	Place-and-Click 0, 100, 100 ms mit Rauschen	<u>Zeit bis zur Aufgabenerfüllung [ms]:</u> $AL = 100 - 17.263 \cdot ZV + 28.158 \cdot ZV^2$ (R ² = .987) → quadratischer Zusammenhang
Jay & Hubbard (2005, 1994)	Place-and-Click visuell: 37, 62, 77, 112, 187 ms haptisch: 44, 69, 94, 119, 194 ms	<u>Manuelles Zeitintervall [ms], visuell verzögert:</u> $AL = 100 + 0.172 \cdot ZV + 0.001 \cdot ZV^2$ (R ² = .931) → quadratischer Zusammenhang
		<u>Manuelles Zeitintervall [ms], haptisch und visuell verzögert:</u> $AL = 100 + 0.183 \cdot ZV + 0.001 \cdot ZV^2$ (R ² = .952) → quadratischer Zusammenhang
		<u>Manuelles Zeitintervall [ms], haptisch verzögert:</u> $AL = 100 + 0.099 \cdot ZV - 5 \cdot 10^{-6} \cdot ZV^2$ (R ² = .858) → quadratischer Zusammenhang
Ferrell (1966)	Krafttracking 0, 300, 1000, 3000 ms	<u>Halten von Kontakt [ms]:</u> $AL = 100 + 0.320 \cdot ZV$ (R ² = .999) → linearer Zusammenhang
		<u>Ausgleichen von Federkraft [ms]:</u> $AL = 100 + 0.225 \cdot ZV$ (R ² = .996) → linearer Zusammenhang
Ottensmeyer, Hu, Thompson, Ren & Sheridan (2000)	Telemanipulative, kooperative Chirurgieaufgaben 0, 600, 1200 ms	<u>Zeit für Greifen, Transferieren [ms]:</u> $AL = 100 + 0.089 \cdot ZV$ (R ² = 1.000) → linearer Zusammenhang

Autoren	Aufgabentyp und Verzögerungsstufen	Funktioneller Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung (AL in %) und Zeitverzögerung (ZV in ms) (R ² als Maß für die Anpassungsgüte der Funktion an die Daten)
		<u>Zeit für Greifen, Transferieren, Kontrolle der Orientierung [ms]:</u> AL = 100 + 0.097 · ZV (R ² = .999) → linearer Zusammenhang
		<u>Zeit für Platzierung von Klemmen [ms]:</u> AL = 100 + 0.297 · ZV (R ² = .996) → linearer Zusammenhang
		<u>Zeit für Benutzen laparoskopischer Scheren [ms]:</u> AL = 100 + 0.242 · ZV (R ² = .989) → linearer Zusammenhang
Zeitverzögerung im haptischen Kanal		
Sharpe (1988)	Identifikation 6, 9, 15, 18, 36, 60, 84, 120 ms	<u>Nicht quantifizierbar</u> auf Grund der Konfundierung mit der Güte der Krafrückmeldung.

Unabhängig davon, ob die verzögerte Rückmeldung im visuellen oder auch im haptischen Kanal erfolgt und trotz der unterschiedlichen Performanzmaße, scheint der Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Zeitverzögerung einer quadratischen Funktion zu folgen. Lediglich bei großen Zeitverzögerungen über ca. 500 ms zeichnet sich eine lineare Funktion ab.

Es gibt Hinweise darauf, dass die verschiedenen Modalitäten – vereinfacht dargestellt – zunächst einzeln verarbeitet und erst in einem späteren kognitiven Prozess assoziiert werden, die sensorische Verarbeitung verläuft somit zunächst parallel, dann seriell (Treisman & Gelade, 1980; Treisman, 1987). Betrachtet man nun die Schleife der in Kapitel 4.4.1. dieser Arbeit vorgestellten Informationsverarbeitungsprozessoren, liegt die Vermutung nahe, dass bei einer Zeitverzögerung unter 500 ms kognitiv ein zusätzlicher Abgleich zwischen der visuellen und der haptischen Modalität vorgenommen wird. Die eigentlich parallelen Prozesse (visuelle und haptische perzeptuelle Verarbeitung) werden interaktiv miteinander verschaltet, um die Synchronie der Daten zu überprüfen. Das erklärt den multiplikativen Effekt der Zeitverzögerung, also den quadratischen Term. Bei einer Zeitverzögerung über 500 ms scheint dieser Abgleich nicht mehr nötig bzw. möglich zu sein. Dann ist jedoch auch denkbar, dass es bestimmte Aufgabentypen gibt, bei denen solch ein Abgleich generell nicht nötig ist, bei dem die Funktion also von vorneherein linear verläuft. Denkbar ist dies beispielsweise bei freien Bewegungen ohne Referenzgröße, d.h. wenn der Benutzer sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt und keine Kontaktsituation vorkommt, ist nur der Beginn der Bewegung verzögert, der eigentliche Bewegungsablauf erscheint dem Benutzer dann synchron.

Die Aufgabenabhängigkeit zeigt sich in den unterschiedlichen Zahlenwerten der einzelnen Funktionen und soll hier nicht näher betrachtet werden.

4.4.3. Effekte der Zeitverzögerung von visuellen und haptischen Daten auf das Telepräsenzerleben

Held & Durlach (1991) untersuchten mit 12 Versuchspersonen die Effekte von visueller Zeitverzögerung auf die Adaptation bei der Auge-Hand-Koordination (Asynchronie zwischen visueller und propriozeptiver Rückmeldung). Als Aufgabe verwendeten sie ein kompensatorisches Bahntracking, das telepräsent entweder passiv oder aktiv durchgeführt werden sollte. Dabei führten sie Zeitverzögerung in verschiedenen Stufen ein (0, 30, 60, 120, 150, 210, 330 und 570 ms).

Als abhängige Variable diente die Kompensationsperformanz als Maß für die Adaptation, d.h. das Ausmaß, mit dem der menschliche Operator seinen Körper mit dem Slaveroboter identifizieren kann. Das Ausmaß an Telepräsenzempfinden operationalisierten die Autoren als die Fähigkeit des Menschen, an das System zu adaptieren.

Beim passiven Kompensationstracking war die Adaptationsrate insgesamt geringer als beim aktiven.

Es zeigte sich ein Haupteffekt für die Zeitverzögerung in allen Bedingungen, wobei sich sehr kurze Verzögerungen (30 und 60 ms) nicht signifikant von 0 ms unterschieden, die nächste Stufe (120 ms) jedoch unterschied sich signifikant von 0 ms Verzögerung. Die Adaptationsrate wurde also zwischen 60 und 120 ms reduziert.

Die Abnahme der Adaptationsleistung verlief asymptotisch, das Maximum der Abnahme betrug 30-40 % und zeigte sich ab 330 ms. Tabelle 4.43 gibt eine Übersicht über die Kompensationsperformanz in Abhängigkeit von den Zeitverzögerungsstufen.

TABELLE 4.43. Zusammenhang zwischen Kompensationsleistung und Zeitverzögerung bei Held & Durlach (1991).

Verzögerung [ms]	Kompensationsleistung [inches]
0	0.68
30	0.68
60	0.57
120	0.43*
150	0.36
210	0.40
330	0.27
570	0.30

*signifikante Verschlechterung ab dieser Stufe

Wie schon bei der Aufgabenleistung zeigt sich auch hier ein quadratischer Zusammenhang zwischen Telepräsenzerleben (TPE) und Zeitverzögerung (ZV) (normiert auf 100% Basistelepräsenzerleben):

$$\text{TPE} = 100 - 0.309 \cdot \text{ZV} + 0.0004 \cdot \text{ZV}^2 \quad (R^2 = .938).$$

Es ist also anzunehmen, dass das Telepräsenzerleben denselben Verlauf zeigt wie die Aufgabenleistung bezüglich des Zusammenhangs zur Zeitverzögerung.

4.4.4. Theoretische Herleitung des psychologischen Modells zu konstanter Zeitverzögerung von visuellen und haptischen Daten und Hypothesen

In Kapitel 4.4.1. dieser Arbeit wurde hergeleitet, dass sensorische Zeitverzögerungen zwar sehr früh wahrgenommen werden (unter 50 ms), diese sich jedoch erst ab 100 bis 200 ms auf die Aufgabenleistung auswirken.

Im Kapitel 4.4.2. konnte gezeigt werden, dass zwischen Aufgabenleistung und Zeitverzögerung ein quadratischer Zusammenhang besteht, so lange die Zeitverzögerung unter etwa 500 ms bleibt. Bei Zeitverzögerungen über 500 ms ergibt sich ein linearer Zusammenhang.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die von Menschen schlechtere Kompensierbarkeit von variablen als von konstanten Zeitverzögerungen.

Schließlich ergab sich im Kapitel 4.4.3., dass das Telepräsenzerleben ebenfalls einen quadratischen Zusammenhang zur Zeitverzögerung aufweist. Ob auch für große Zeitverzögerungen über 500 ms ein linearer Verlauf gilt, bleibt unklar.

Insgesamt wird somit folgender prinzipieller Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung (AL) bzw. Telepräsenzerleben (TPE) und Zeitverzögerung (ZV) angenommen:

$$AL/TPE = \begin{cases} b_0; & 0 \leq ZV \leq 100 - 200\text{ms} \\ b_0 + b_1 \cdot ZV + b_2 \cdot ZV^2; & 100 - 200\text{ms} < ZV \leq 500\text{ms} \\ b_0 + b_1 \cdot ZV; & ZV > 500\text{ms} \end{cases}, \text{ wobei}$$

- b_0 : Grundbearbeitungszeit für die Aufgabe ohne Zeitverzögerung,
- b_1 : aufgabenspezifischer Faktor für den linearen Term (möglicher Weise die zusätzliche Zeit des perzeptuellen und des kognitiven Prozessors, die durch die Zeitverzögerung benötigt wird),
- b_2 : aufgabenspezifischer Faktor für den quadratischen Term (möglicher Weise die durch die Zeitverzögerung zusätzlich benötigte Zeit für den Abgleich der visuellen und haptischen Modalität, der ab ca. 500 ms nicht mehr möglich bzw. nötig ist).

Diese Beziehung gilt sowohl für Zeitverzögerungen im visuellen als auch im visuellen und haptischen Kanal. Die Abbildung 4.33 stellt diesen vermuteten Zusammenhang graphisch dar.

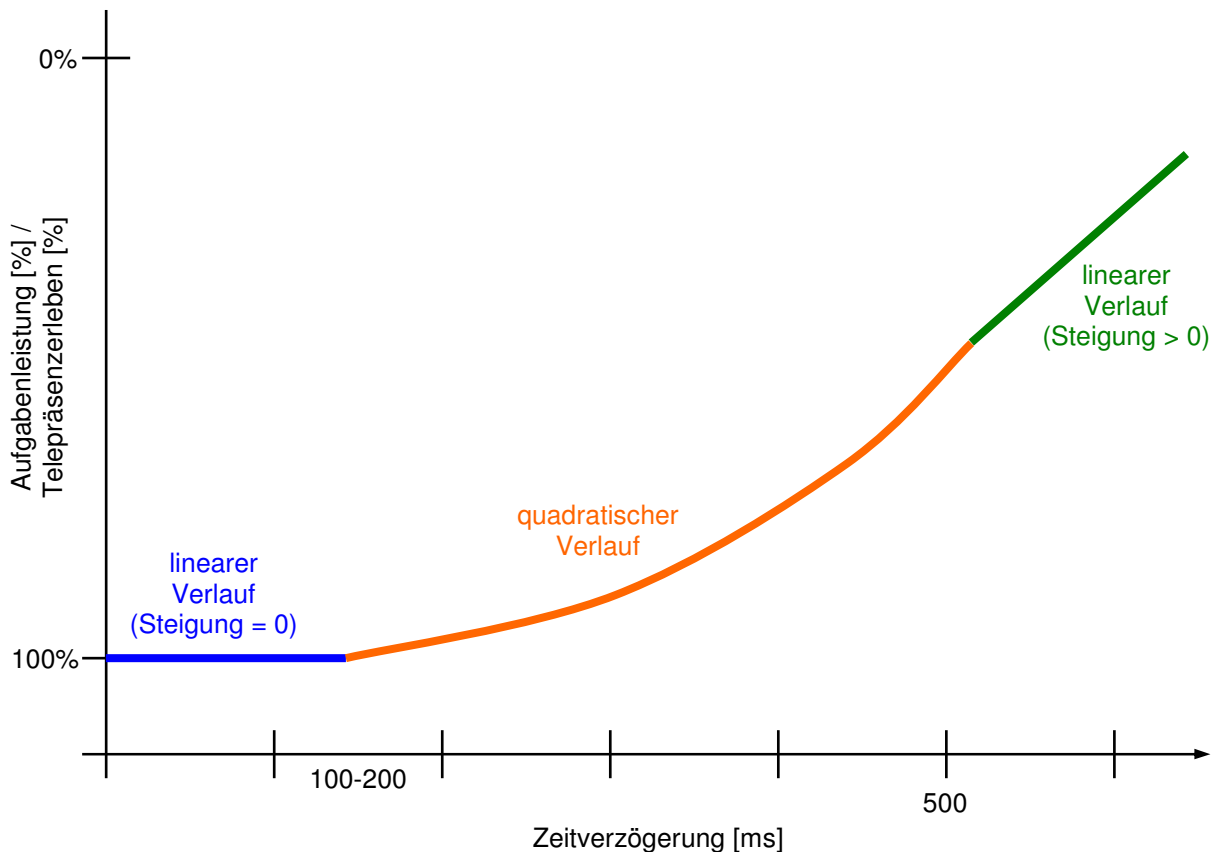


ABBILDUNG 4.33. Angenommener Verlauf des Abfalls der Aufgabenleistung bzw. des Telepräsenzerlebens in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung (visuell bzw. visuell/haptisch). Die Kurven für Aufgabenleistung und Telepräsenzerleben können sich dabei unterscheiden, zeigen jedoch denselben prinzipiellen Verlauf.

Aus diesem Modell und den vorangegangenen Betrachtungen lassen sich nun folgende Haupthypothesen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Aufgabenleistung bzw. Telepräsenzerleben und Zeitverzögerung aufstellen:

- H_{ZV1}**: Die Zeitverzögerung im haptischen und visuellen Kanal zeigt eine beeinträchtigende Wirkung auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden.
- H_{ZV2}**: Variable Zeitverzögerung zeigt einen stärker negativen Effekt als konstante Zeitverzögerung, d.h. bei variabler Zeitverzögerung brechen die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben bei geringerer mittlerer Zeitverzögerung ein als bei konstanter Zeitverzögerung.
- H_{ZV3}**: Für konstante Zeitverzögerungen zeigt sich der angenommene Verlauf (s. Abb. 4.33).
- H_{ZV4}**: Die Zeitverzögerung hat einen stärkeren Effekt auf das Telepräsenzerleben als auf die Aufgabenleistung, da bei letzterer open-loop-Elemente enthalten sind, die nicht auf eine Rückmeldung angewiesen sind. Das Telepräsenzerleben hingegen ist vollständig von der Rückmeldung abhängig.

H_{ZV5}: Die Zeitverzögerung hat eine stärker beeinträchtigende Auswirkung für Kontaktaufgaben (constraint motion) als für Aufgaben mit freier Bewegung (free-space-motion).

H_{ZV6}: Zeitverzögerungen können von Menschen durch Einstellung und gezielte Manipulation physikalischer Parameter (z.B. Kontrolle der Nachgiebigkeit auf der Roboterseite; Bejczy & Kim, 1990) besser kompensiert werden als ohne die Modifikation dieser Einflussgrößen.

H_{ZV7}: Da Zeitverzögerungen schon ab einem sehr kleinen Betrag (< 50 ms) wahrgenommen werden, wird der Betrag der Zeitverzögerung von den Probanden systematisch überschätzt. Zudem kann der Betrag der Zeitverzögerung nur schlecht eingeschätzt werden.

4.4.5. Untersuchung der Effekte variabler Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben

Um den Einfluss variabler Zeitverzögerung auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben zu untersuchen, wurde in Kooperation mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb, Hauptverantwortliche: Stella Clarke) der Technischen Universität München ein Experiment durchgeführt, bei dem die haptischen und visuellen Daten über das Internet von München, Deutschland, nach Wollongong, Australien und wieder zurück geschickt wurden. Dabei entstanden eine stochastische Gesamtverzögerung (Round Trip Time) von durchschnittlich 360 ms und Paketverluste bis zu 10%.

Zusätzlich wurde untersucht, ob die Einführung von zusätzlicher Trägheit in das System die Effekte der Zeitverzögerung abschwächt. Trägheit ist der Widerstand eines Körpers gegen eine Bewegungsänderung (Hering, Martin & Stohrer, 1995, S. 32). Perzeptuell erscheinen Körper durch zusätzliche Trägheit schwerer, der Benutzer kann dies entweder durch eine geringere Bewegungsgeschwindigkeit bzw. -beschleunigung oder durch mehr Kraftaufwand ausgleichen. Falls die Bewegungsgeschwindigkeit angepasst wird, sollten höhere Zeitverzögerungen vom Benutzer kompensierbar sein. Sheridan & Ferrell (1963) sowie Ferrell (1964, 1966) konnten zeigen, dass die Adaptation einer langsameren Bewegung v.a. bei haptischen Zeitverzögerungen häufig als Strategie eingesetzt wird.

Die Fähigkeit, Trägheit zu simulieren, ist eine allgemeine Eigenschaft haptischer Ein-/Ausgabegeräte. Zusätzliche Trägheit zu simulieren kann sehr einfach durch das Hinzufügen einer simulierten Masse am Endpunkt des Ein-/Ausgabegeräts implementiert werden (Brouwer, MacLean & Hodgson, 2004; Sensable Technologies Inc., 2000). Allerdings bedeutet die Implementierung zusätzlicher Trägheit die Verfälschung der Krafterückmeldung, daher wird meist angestrebt, die Trägheit bei solchen Geräten so gering wie möglich zu halten (Conklin & Tosunoglu, 1996). Bei Zeitverzögerungen könnte es sich jedoch herausstellen, dass eine zusätzliche simulierte Trägheit die negativen Effekte der Verzögerung abschwächt. Hierzu wurde zusätzliche Trägheit, die als zusätzliche Masse am Endpunkt des haptischen Ein-/Ausgabegeräts (in diesem Fall ein PHANTOM Desktop) implementiert wurde, in drei Stufen eingeführt: keine zusätzliche Trägheit (0 kg), ein ebenmerklicher Unterschied für Trägheit ($4.00 \cdot 10^{-4}$ kg) und zwei ebenmerkliche Unterschiede für Trägheit ($8.00 \cdot 10^{-4}$ kg). Dabei sollte sich die zusätzliche Trägheit ohne Zeitverzögerung störend auf die

Aufgabenleistung und das Präsenzerleben auswirken, da sie dann eine Verfälschung der haptischen Rückmeldung bedeutet. Bei Zeitverzögerungen sollten sich durch diese zusätzliche Trägheit die negativen Effekte auf Aufgabenleistung und Präsenzerleben abmildern.

Als weitere unabhängige Variable wurde untersucht, ob die Aufgabenleistung durch Übung unter Zeitverzögerungsbedingung gegenüber Übung ohne Zeitverzögerung verbessert werden kann. Es wird angenommen, dass eine Manipulation unter Zeitverzögerung nicht geübt werden kann, da diese für Menschen einen unnatürlichen Zustand darstellt, bei dem nur mit exzessiver Übung eine Automatisierung stattfinden kann.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen sollten virtuell mit dem PHANTOM Desktop Ein-/Ausgabegerät einen Torus zunächst von der Mitte des Bildschirms (Anfangsposition) zur linken Seite bewegen, und den Torus dann über ein virtuelles Kabel führen. Dies sollten sie so schnell und genau wie möglich durchführen, das Hauptziel bestand jedoch darin, das virtuelle Kabel nicht zu berühren. Die Probanden trugen dabei Shutterbrillen, um einen dreidimensionalen visuellen Eindruck zu erhalten. Abbildung 4.34 zeigt den experimentellen Aufbau zur Untersuchung der Effekte von variabler Zeitverzögerung.

Zunächst sollten die Versuchspersonen die Aufgaben üben. Dabei wurde als Gruppierungsfaktor variiert, ob die Übung mit oder ohne Zeitverzögerung (was einer minimalen Zeitverzögerung von 2 ms entspricht) absolviert wurde. Die Zeitverzögerung wurde bei der Übung lokal simuliert und betrug konstant 360 ms. Die Übungsbedingungen wurden über die Versuchspersonen balanciert.

Nach der Übungsphase führten die Versuchspersonen das eigentliche Experiment durch. Dabei wurde Zeitverzögerung (mit variabler Zeitverzögerung über das Internet, durchschnittlich 360 ms vs. ohne Zeitverzögerung) und Trägheit in den oben genannten drei Stufen variiert. Jede Versuchsperson bekam hier jede Bedingung, durchlief als insgesamt sechs Durchgänge; diese wurden sequentiell balanciert. Nach jedem Durchgang sollten die Probanden zwei Fragen bezogen auf das Präsenzerleben beantworten. Diese wurden aus dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) entnommen und lauteten:

- (1) Wie stark fühlten Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt? (auf einer Skala von 1 bis 5; 1 = sehr wenig, 5 = sehr stark).
- (2) Wie groß war die Verzögerung zwischen Ihren Aktionen und den erwarteten Reaktionen? (auf einer Skala von 1 bis 5; 1 = sehr klein, 5 = sehr groß).

Zusätzlich wurden die Versuchspersonen gefragt, wie hoch sie die Zeitverzögerung in ms einschätzen.

Nach dem Experiment füllten die Probanden einen Fragebogen mit den Daten Alter, Geschlecht und Händigkeit aus.

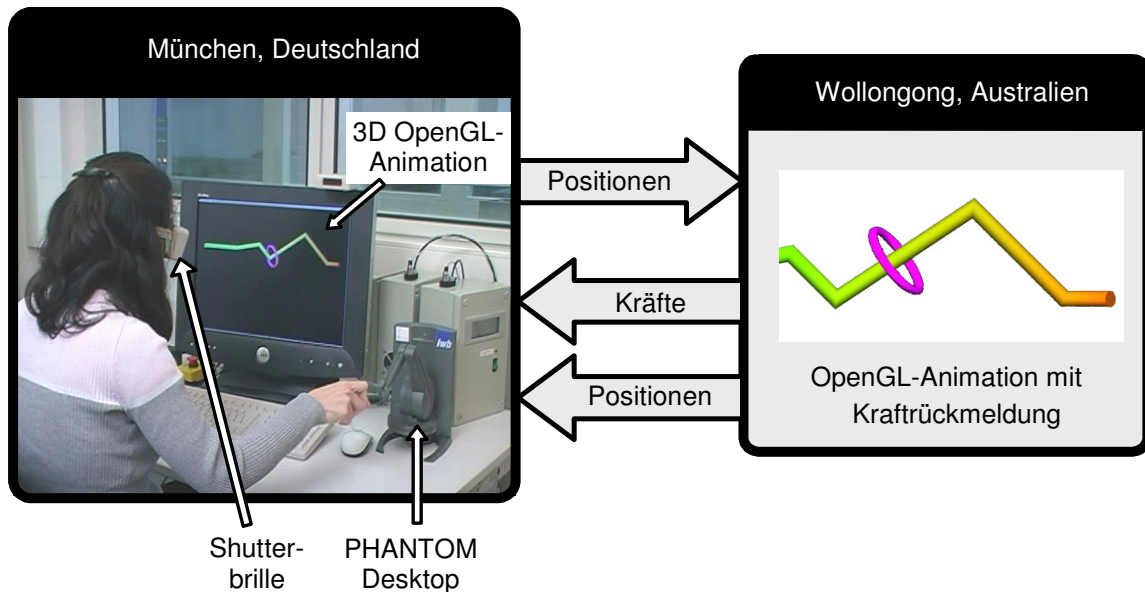


ABBILDUNG 4.34. Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Effekte variabler Zeitverzögerung.

Methoden

a) Design

Als abhängige Variablen dienten die mittlere Abweichung in sagittaler Richtung, die mittlere Abweichung in vertikaler Richtung, das Präsenzerleben, das mittels der beiden Ratingfragen erhoben wurde sowie die Einschätzung des Betrags der Zeitverzögerung in ms.

Die unabhängigen Variablen waren die Zeitverzögerung (variabel 360 ms vs. keine), die Trägheit (3 Stufen) als Messwiederholungsfaktoren und die Übungsbedingung (Übung mit vs. Übung ohne Zeitverzögerung) als Gruppierungsfaktor [2 x 3 x 2 – Design].

b) Stichprobe

36 Versuchspersonen im Alter zwischen 20 und 62 Jahren nahmen an dem Versuch teil (mittleres Alter 31.92 Jahre, Standardabweichung 9.92 Jahre). Sieben Versuchspersonen waren weiblich, 29 männlich. Alle gaben an, Rechtshänder zu sein.

Ergebnisse

Die mittlere Abweichung sowohl in sagittaler als auch in vertikaler Richtung wurde berechnet als der mittlere Abstand des Torusmittelpunkts vom Mittelpunkt des virtuellen Kabels, wobei der Torusradius als Referenz fungierte und auf 1000 virtuelle Einheiten gesetzt wurde. Das Präsenzerleben wurde über den Mittelwert der angegebenen Ratings berechnet.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Alter und Geschlecht der Versuchspersonen zeigten keine signifikanten Korrelationen mit der Aufgabenleistung bzw. mit dem Präsenzerleben.

Der Gesamtmittelwert für die mittlere Abweichung in sagittaler Richtung betrug 227 mit einer Standardabweichung von 218 und für die mittlere Abweichung in vertikaler Richtung war der Mittelwert 308, die Standardabweichung 300. Die Präsenzfrage,

inwiefern sich die Versuchspersonen in die Umgebung hineinversetzen konnten, wies einen Gesamtmittelwert von 3.08 und eine Standardabweichung von 0.58 auf, die Frage nach dem Ausmaß der Verzögerung hatte einen Gesamtmittelwert von 2.80 mit einer Standardabweichung von 0.49. Die Probanden gaben im Durchschnitt eine Zeitverzögerung von 869 ms in dem Bereich zwischen 50 bis 4500 ms an (Standardabweichung 885).

2. Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Präsenzerleben

Um den Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Präsenzerleben zu untersuchen, wurden Korrelationen über alle 216 Durchgänge mit den Variablen mittlere Abweichung in sagittaler Richtung, mittlere Abweichung in vertikaler Richtung, Präsenzrating 1 und Präsenzrating 2 durchgeführt.

Die beiden Abweichungsmaße korrelierten hoch miteinander, $r = .728$, $p < .000$, $n = 216$. Demnach entwickelten sich die Beträge für beide Abweichungsrichtungen gleich.

Ebenso zeigte sich eine negative mittlere Korrelation zwischen den beiden Präsenzfragen, $r_{\text{Spearman}} = -.556$, $p < .000$, $n = 216$. Versuchspersonen, die sich mehr hineinversetzt fühlten, empfanden also die Verzögerung als geringer als Personen, die sich weniger hineinversetzt fühlten und umgekehrt. Dies ist ein Indikator für den negativen Effekt der Zeitverzögerung auf das Präsenzerleben. Tatsächlich konnte eine mittelhohe Korrelation zwischen Zeitverzögerungsbedingung (ja vs. nein) und dieser Präsenzfrage gefunden werden, $\tau_{\text{Kendall}} = .647$, $p < .000$, $n = 216$, was für die Sensitivität der Probanden gegenüber Zeitverzögerungen spricht.

Um den Zusammenhang zwischen mittlerer Abweichung und Präsenzerleben wurden auf Grund der hohen Korrelation die beiden Abweichungsmaße zum Mittelwert zusammengefasst. Die mittlere Abweichung wies eine negative, mittelhohe Korrelation mit der Präsenzfrage, wie gut sich die Person hineinversetzen konnte, auf, $r_{\text{Spearman}} = -.629$, $p < .000$, $n = 216$. Je mehr sich die Versuchspersonen also in die Umgebung hineinversetzen konnten, desto geringer war ihre mittlere Abweichung. Bei der mittleren Abweichung und der zweiten Präsenzfrage nach der Höhe der Verzögerung ergab sich eine positive, mittelhohe Korrelation, $r_{\text{Spearman}} = .585$, $p < .000$, $n = 216$. Je höher die Probanden die Zeitverzögerung einschätzten, desto größer war auch ihre mittlere Abweichung. Ob die bessere Leistung ein höheres Präsenzerleben nach sich zog oder ob umgekehrt ein hohes Präsenzerleben zu einer besseren Aufgabenperformanz führte, bleibt ungeklärt, wobei sowohl beide kausale Richtungen als auch die Moderation durch Drittvariablen plausibel erscheinen.

3. Einfluss der unabhängigen Variablen auf Aufgabenleistung und Präsenzerleben

Eine multivariate dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Messwiederholungsfaktoren Zeitverzögerung (\emptyset 360 ms vs. keine) und Trägheit (3 Stufen) und dem Gruppierungsfaktor Übungsbedingung (mit Zeitverzögerung vs. ohne Zeitverzögerung) und den abhängigen Variablen mittlere Abweichung in sagittaler Richtung, mittlere Abweichung in vertikaler Richtung, Präsenzfrage 1 und Präsenzfrage 2

wurde berechnet. Tabelle 4.44 gibt das multivariate Ergebnis der Varianzanalyse an (die F-Statistik wurde nach dem Spur-Kriterium nach Pillai berechnet).

TABELLE 4.44. Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse.

Quelle	df	F	η^2	p
		zwischen Vpn		
Übungsbedingung (ÜB)	4, 31	0.33	.041	.854
		innerhalb Vpn		
Zeitverzögerung (ZV)	4, 31	108.92*	.934	< .000
ZV x ÜB	4, 31	0.36	.044	.836
Trägheit (TH)	8, 27	1.14	.252	.370
TH x ÜB	8, 27	0.51	.131	.839
ZV x TH	8, 27	1.36	.288	.257
ZV x TH x ÜB	8, 27	0.71	.175	.677

*signifikant ($\alpha = 5\%$).

Wie aus Tabelle 4.44 zu entnehmen ist, zeigte lediglich der Faktor Zeitverzögerung einen signifikanten Haupteffekt, alle anderen Haupteffekte und Interaktionen erwiesen sich als nicht signifikant.

Betrachtet man die univariaten Effekte der Zeitverzögerung auf die einzelnen abhängigen Variablen, so zeigt sich, dass sich dieser Faktor signifikant auf alle vier abhängigen Variablen auswirkt:

$$F_{\text{mittlere Abweichung sagittal}}(1,34) = 114.64, \eta^2 = .771, p < .000;$$

$$F_{\text{mittlere Abweichung vertikal}}(1,34) = 45.11, \eta^2 = .570, p < .000;$$

$$F_{\text{Präsenzfrage 1}}(1,34) = 137.40, \eta^2 = .802, p < .000;$$

$$F_{\text{Präsenzfrage 2}}(1,34) = 163.41, \eta^2 = .828, p < .000.$$

Bei der Zeitverzögerungsbedingung zeigte sich bei jeder abhängigen Variablen eine Verschlechterung. Die Hypothese H_{ZV1} , dass sich die Zeitverzögerung negativ auf die Aufgabenleistung und auf das Präsenzerleben auswirkt, konnte somit für variable Zeitverzögerungen bestätigt werden.

Bezüglich der Aufgabenleistung war die mittlere Abweichung in sagittaler Richtung bei der variablen Zeitverzögerung gegenüber keiner Zeitverzögerung um 460% erhöht, die mittlere Abweichung in vertikaler Richtung um 255%, was einen enormen Leistungsabfall von durchschnittlich 358% bedeutet. Abbildung 4.35 stellt diese Effekte graphisch dar.

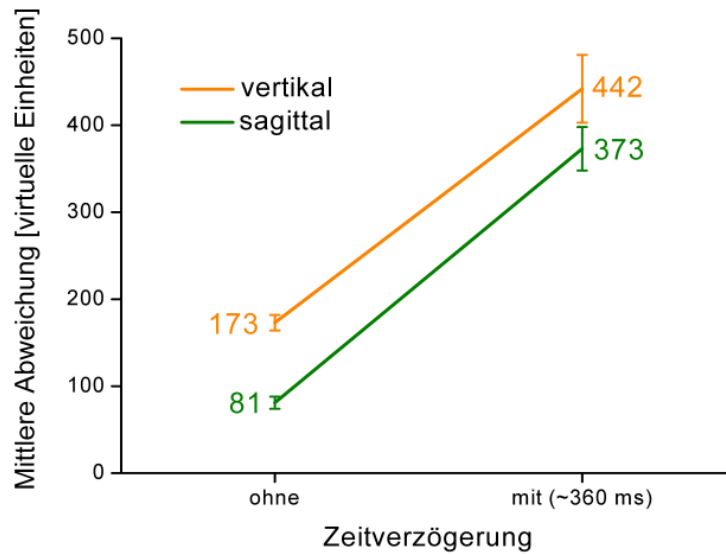


ABBILDUNG 4.35. Haupteffekt des Faktors Zeitverzögerung auf die mittleren Abweichungen in sagittaler und vertikaler Richtung (Aufgabenleistungsmaße).

Im Hinblick auf das Präsenzerleben gaben die Versuchspersonen bei der Frage, wie gut sie sich hineinversetzen konnten, im Mittel 2.0 Ratingpunkte weniger bei der Zeitverzögerungsbedingung an als bei der Bedingung, in der keine Zeitverzögerung vorhanden war (entspricht einer Verschlechterung um 322%). Hingegen war die subjektive Empfindung der Verzögerung (Frage 2) bei der Zeitverzögerungsbedingung gegenüber fehlender Zeitverzögerung um 2.3 Ratingpunkte erhöht (entspricht einer Verschlechterung um 241%). Durchschnittlich verschlechterte sich das Präsenzerleben also um 282%. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 4.36 dargestellt.

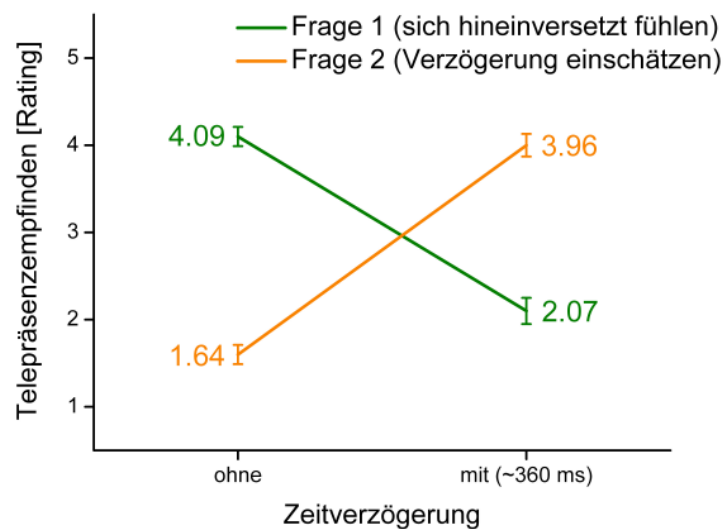


ABBILDUNG 4.36. Haupteffekt des Faktors Zeitverzögerung auf die beiden Präsenzfragen.

Die Hypothese H_{ZV4} , dass sich die Zeitverzögerung stärker auf das Präsenzerleben auswirkt als auf die Aufgabenleistung, konnte somit nicht bestätigt werden, da hier der gegenteilige Effekt auftrat. Das Präsenzerleben zeigte sich robuster gegenüber Zeitverzögerungen als die Aufgabenleistung.

Bezüglich der Simulation von zusätzlicher Trägheit wurde angenommen, dass dies bei Zeitverzögerung einen kompensatorischen Effekt auf Aufgabenleistung und Telepräsenzerleben ausübt, während sich die zusätzliche Trägheit negativ bei fehlender Zeitverzögerung auswirkt. Es wurde also eine Interaktion zwischen den Faktoren Zeitverzögerung und Trägheit erwartet. Die Interaktion erwies sich jedoch als nicht signifikant, diese Hypothese konnte nicht bestätigt werden. Die zusätzliche Trägheit führte weder zu einer Verschlechterung bei den abhängigen Variablen, wenn keine Zeitverzögerung vorgegeben wurde, noch zu einer Verbesserung, wenn Zeitverzögerung vorhanden war. In diesem Experiment konnten die Versuchspersonen also die zusätzlich eingeführte Trägheit nicht als Kompensationsstrategie für die auftretenden Zeitverzögerungen nutzen, die Hypothese H_{ZV6} wird für den physikalischen Parameter Trägheit verworfen.

Der Faktor Übung erwies sich als nicht signifikant, es spielte also keine Rolle, ob den Versuchspersonen die Möglichkeit gegeben wurde, die Aufgabe mit Zeitverzögerung zu üben oder nicht. Dies bestätigt die Hypothese, dass Manipulationen unter Zeitverzögerung nicht in der üblichen Zeit geübt werden können, sondern entweder gar nicht trainiert werden können oder mit mehr Übungszeit verbunden sind.

4. Güte der Einschätzung der Zeitverzögerung

Als zusätzliche abhängige Variable wurde bei jedem Durchgang erfragt, wie hoch die Versuchspersonen die Zeitverzögerung in ms einschätzten. Um die Güte dieser Einschätzung zu testen, wurde ein Einstichproben-t-test gegen die durchschnittliche Zeitverzögerung von 360 ms durchgeführt. Der Test ergab, dass sich die Einschätzung von durchschnittlich 869 ms signifikant vom Testwert 360 ms unterschied, die Versuchspersonen die Höhe der Zeitverzögerung also sehr schlecht einschätzen konnten, $t(35) = 3.46, p < .000$.

Die Zeitverzögerung wurde dabei systematisch überschätzt, nur 30.56% ($n = 11$) der Probanden schätzten die Zeitverzögerung auf 300 ms und geringer, die restlichen 69.44% ($n = 25$) gaben als Einschätzung eine Verzögerung von über 400 ms an, dabei schätzten noch 27.78% ($n = 10$) die Zeitverzögerung auf einen Betrag von 1000 ms und höher.

Die Erwartungen in Hypothese H_{ZV7} bezüglich der Güte der Einschätzung von Zeitverzögerungen konnten in diesem Experiment zur Auswirkung variabler Zeitverzögerung somit bestätigt werden.

4.4.6. Untersuchung der Effekte konstanter Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden

Zur Untersuchung der Auswirkungen konstanter Zeitverzögerungen auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden wurde ein Experiment in Kooperation mit dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR, Hauptverantwortliche: Jordi Artigas Esclusa, Philipp

Kremer und Carsten Preusche) in Oberpfaffenhofen durchgeführt, bei dem die haptischen und visuellen Daten synchron verzögert wurden. Die Verzögerung wurde über ein Local Area Network simuliert. Dabei wurden Zeitverzögerungen von 0 bis 600 ms realisiert, die synchron haptisch und visuell appliziert wurden.

Um das im Kapitel 4.4.4. aufgestellte psychologische Modell zur Zeitverzögerung zu überprüfen, wird bei der Auswahl der Stufen für die Zeitverzögerungsbedingung für den Bereich bis 200 ms eine feinere Auflösung benötigt, um den dort erwarteten linearen Verlauf zu testen. Da für den Bereich bis ca. 500 ms eine quadratische Funktion angenommen wird, sollten hier mindestens drei Stützstellen ausgewählt werden. Im Bereich von 500 ms und darüber sollten mindestens zwei Stufen untersucht werden, um den linearen Verlauf abschätzen zu können.

Daher wurden folgende Zeitverzögerungsstufen ausgewählt:

- für den Bereich bis 200 ms: Stufen 0 (entspricht einer technisch minimal möglichen Zeitverzögerung von ca. 10 bis 15 ms), 50, 100 und 150 ms;
- für den Bereich des angenommenen quadratischen Verlaufs: 200, 250, 300 und 400 ms;
- für den oberen Bereich, für den eine lineare Funktion erwartet wird: 500 und 600 ms (da es technisch sehr schwierig ist, so hohe Zeitverzögerungen zu implementieren und dabei die Systemstabilität zu gewährleisten, konnten höhere Zeitverzögerung nicht realisiert werden).

Zwei Aufgabenteile wurden verwirklicht, um die Aufgabenabhängigkeit bei der Einführung von Zeitverzögerung zu berücksichtigen. Ein Aufgabenteil bestand vorwiegend aus Bewegungen im freien Raum (free-space-motion), der andere vorwiegend aus Objektkontakt (constraint motion). Nach den Ausführungen im Kapitel 4.4.2. sollte der Aufgabenteil mit Objektkontakt bezüglich Aufgabenleistung und Telepräsenzerleben stärker von der Zeitverzögerung betroffen sein als die Bewegung im freien Raum.

Um ein Telepräsenzsystem bei Zeitverzögerungen zu stabilisieren, werden besondere regelungstechnische Ansätze benötigt. In dieser Untersuchung wurde die Wave-Variables-basierte Regelung eingesetzt, bei dem ein System unabhängig von der Größe der Zeitverzögerung passiv und daher stabil ist (für eine genauere Darstellung s. Niemeyer & Slotine, 1997a, 1997b, 2004; Lew, Repperger & Berlin, 2004). Als physikalischer Einstellungsparameter fungiert bei diesem Ansatz die Wave Impedance, mittels der das Verhältnis zwischen Steifigkeit und Dämpfung auf der Slavesseite reguliert werden kann. Wenn der Betrag der Wave Impedance groß ist, resultiert das in einem schwergängigen („slow-moving“) System, was einer höheren Dämpfung entspricht, und die Krafrückmeldung aus der entfernten Umgebung wird dadurch genauer. Bei einem kleinen Betrag der Wave Impedance resultiert ein leichtgängiges („fast-moving“) System, die Dämpfung wird niedriger und die Krafrückmeldung schwächer (Niemeyer, 1996). Um den Einfluss dieses Parameters auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben zu untersuchen, wurde die Wave Impedance in drei Stufen eingeführt (kleiner, mittlerer und hoher Betrag). Bei Bewegungen im freien Raum wird erwartet, dass eine niedrige Wave Impedance zu einer besseren Aufgabenleistung und einem höheren Telepräsenzerleben führt, wohingegen sich bei Objektkontakt eine hohe Wave Impedance vorteilhaft auswirken sollte. Diese Auswirkungen sollten sich bei Zeitverzögerung verstärken.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Das benutzte Telepräsenzsystem stellte ein Montageszenario im Weltraum nach. Die zu bearbeitende Testumgebung für die Weltraummontage bestand aus einem sich bewegenden Board, das einen Satelliten abstrahiert darstellt. Das Board bewegte sich dabei dreidimensional sinusförmig. Die Versuchspersonen hatten zwei Teilaufgaben. Zunächst sollten sie das sich bewegende Board mit den Backengreifern des Slaveroboters an der Einkerbung am Griff am unteren Ende des Boards greifen und fixieren (free-space-motion). Anschließend sollten sie einen auf dem fixierten Board befindlichen Bajonett-Verschluss öffnen (constraint motion). Als Bajonett-Verschluss wurde eine Speakon-Lautsprecher-Steckverbindung gewählt, da der Öffnungsmechanismus von den Backengreifern des Slaveroboters optimal bedient werden konnte. Dafür musste der graue Ring am Verschluss mit den Greifern anvisiert werden, die Probanden mussten dann die Greifer schließen. Der graue Ring war danach nach rechts zu ziehen, im Uhrzeigersinn zu drehen und schließlich wieder nach rechts herauszuziehen, damit sich der Verschluss öffnet. Beim Herausziehen musste sich der Bajonett-Verschluss genau parallel zum Board befinden, da sich der Stecker sonst verkantete. Wenn dies erfolgte, musste noch einmal nachgegriffen werden, dazu mussten vorher die Backengreifer von den Versuchspersonen wieder geöffnet werden.



Diese entfernte Umgebung mit dem Testboard wurde den Versuchspersonen über ein Head Mounted Display (NVIS nVisor SX, Auflösung 1280 x 1024) visuell dargestellt.

Als Slaveroboter wurde der LBR II (Leichtbauroboter der Serie II, Hersteller: DLR) eingesetzt. Dieser wurde kontrolliert durch einen LBR III (Leichtbauroboter der Serie III, DLR), der als Master fungierte. Abbildung 4.37 zeigt die Master- und die Slave-seite des benutzten Telepräsenzsystems.

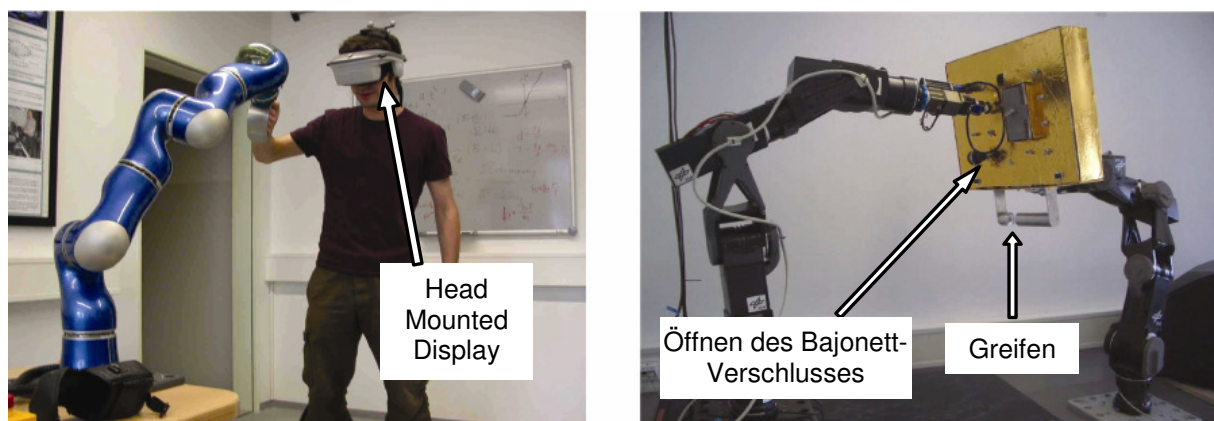


ABBILDUNG 4.37. Operator- (Master, links) und Teleoperator- (Slave, rechts) Seite des Telepräsenzsystems zur Untersuchung der Effekte konstanter Zeitverzögerung bei Weltraummissionen.

Nach einer Einweisung in das System sollten die Versuchspersonen das Öffnen des Bajonett-Verschlusses ohne Zeitverzögerung üben. In Vorversuchen mit drei Experten wurde ermittelt, dass diese maximal 25 bis 30 s brauchten, um den Bajonett-Verschluss zu öffnen. Daher

wurden zwei Übungskriterien festgelegt, nach denen definiert wurde, wann die Versuchspersonen ausreichend Übung besaßen. Die Übungsphase wurde entweder beendet, wenn die Probanden den Bajonett-Verschluss telepräsent in einer Zeit unter 30 s öffneten – dies war das Prioritätskriterium – oder wenn die Zeit für das Öffnen unter 25% der anfangs benötigten Zeit fiel. Nach dem Potenzgesetz der Übung folgt die Zeit für eine Aufgabenbearbeitung auch bei manipulativen Aufgaben beim n-ten Durchgang einem Potenzgesetz:

$$T_n = T_1 \cdot n^{-\alpha},$$

wobei T_1 die Zeit für die Aufgabenbearbeitung beim ersten Durchgang ist und α sich zwischen 0.2 und 0.6 bewegt (s. z.B. Card, Moran & Newell, 1983). Da die Funktion asymptotisch verläuft, wurde berechnet, dass bezüglich der Zeit für die Bearbeitung der Aufgabe ab ca. 25% der Anfangszeit keine signifikante Verbesserung mehr zu erwarten ist.

Nach der Übungsphase begann die eigentliche Testung. Dazu sollten die Versuchspersonen unter den oben genannten zehn Zeitverzögerungsbedingungen und den drei Stufen für die Wave Impedance die Aufgaben „Greifen“ und „Bajonett-Verschluss-Öffnen“ mehrmals hintereinander ausführen. Vor jeder Teilaufgabe wurden die Versuchspersonen mündlich instruiert, „jetzt“ mit der Aufgabe zu beginnen, vorher wurde jeweils die zu absolvierende Teilaufgabe genannt. Dieser Ablauf wurde ebenfalls in der Übungsphase schon trainiert.

Um die Testzeit in einem vernünftigen Maß zu halten, wurden drei Gruppen von Versuchspersonen gebildet, alle drei Gruppen erhielten die drei Wave-Impedance-Bedingungen und die Bedingung ohne Zeitverzögerung, um die drei Gruppen bezüglich der Grundperformanz vergleichen zu können. Allerdings wurden die übrigen Zeitverzögerungsbedingungen unter den drei Gruppen aufgeteilt: Gruppe 1 erhielt die Stufen 50, 200 und 400 ms, Gruppe 2 die Stufen 100, 250 und 500 ms und Gruppe 3 die Stufen 150, 300 und 600 ms. Die Zuweisung der Probanden zu den Gruppen erfolgte parallelisiert nach dem Übungskriterium, das sie erreicht hatten (Aufgabe in weniger als 30 s oder 25% der Anfangszeit) und nach Anzahl der Übungsdurchgänge. Da es technisch bei hohen Zeitverzögerungen schwierig ist, eine niedrige Wave Impedance zu implementieren, war es bei 500 ms nur noch möglich, eine mittlere und hohe Wave Impedance sowie bei 600 ms nur noch eine hohe Wave Impedance zu realisieren. Jede Versuchsperson absolvierte die Aufgaben „Greifen“ und „Bajonett-Verschluss-Öffnen“ also zehn, elf oder zwölf Mal. Nach jedem Durchgang wurden die Probanden um eine Einschätzung der Zeitverzögerung in ms gebeten, und es wurden zwei Fragen zum Telepräsenzerleben gestellt, die aus dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) entnommen wurden:

- (1) Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der entfernten Umgebung? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr unnatürlich, 7 = sehr natürlich);
- (2) Wie stark fühlten Sie sich in die entfernte Umgebung hineinversetzt? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark).

Als Maße für die abhängigen Variablen dienten die Zeit bis zur Beendigung des Greifens, die Zeit bis zur Beendigung des Bajonett-Verschluss-Öffnens, die Einschätzung der Zeitverzögerung und das Telepräsenzerleben mittels den Ratingfragen.

Nach dem Versuch füllten die Probanden den Fragebogen zur immersiven Tendenz (Subskala aus dem Fragebogen von Scheuchenpflug, 2001, bestehend aus elf Fragen) sowie zu den demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit Telepräsenzsystemen (auf einer fünfstufigen Skala von keine bis sehr viel) und wie viel Stunden pro Monat mit Computerspielen mit 3D-Graphik verbracht wurden, aus

Methode

a) Design

Als Maße für die abhängigen Variablen dienten die Zeit bis zur Beendigung des Greifens, die Zeit bis zur Beendigung des Bajonett-Verschluss-Öffnens, die Einschätzung der Zeitverzögerung in ms und das Telepräsenzerleben, das mittels den Ratingfragen erhoben wurde.

Die unabhängigen Variablen waren die Zeitverzögerung (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 und 600 ms) und der Betrag der Wave Impedance (niedrig, mittel und hoch) [10 x 3 – Design].

Für die Zeitverzögerungsstufen lag dabei ein unvollständiger Versuchsplan vor.

b) Stichprobe

30 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 51 Jahren (Mittelwert 27.97 Jahre, Standardabweichung 7.19 Jahre), darunter drei Frauen und 27 Männer, nahmen an dem Versuch teil. Alle gaben an, Rechtshänder zu sein. 20 von ihnen hatten keine Erfahrung mit Telepräsenzsystemen, acht wenig, eine Versuchsperson hatte mittlere und eine viel Erfahrung. Die Spielzeit mit 3D-Computerspielen wurde im Bereich zwischen 0 und 40 Stunden pro Monat angegeben mit einer durchschnittlichen Spieldauer von 3.78 Stunden, Standardabweichung 10.10 Stunden.

Der Gesamtmittelwert der immersiven Tendenz betrug 4.05, die Standardabweichung 0.91 (Range der individuellen Mittelwerte 1.82 bis 5.73).

Ergebnisse

Die Zeit, die für das Greifen benötigt wurde, wurde gemessen als Zeitspanne ab der mündlichen Instruktion, mit dem Greifen zu beginnen, bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Vertiefung am Greifer am unteren Ende des Boards von den Backengreifern eingeschlossen war. Nach einer Maximalzeit von 3 min wurde die Teilaufgabe abgebrochen, wenn das Board bis dahin nicht gegriffen wurde.

Ebenso wurde die Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses ermittelt ab der Startanweisung bis zum Herausziehen des Bajonett-Verschlusses. Der Verschluss musste dabei vollständig gelöst sein. Die Abbruchzeit wurde hier auf 4 min gesetzt.

Wenn die Maximalzeit erreicht war, wurde diese für die nachfolgenden Analysen eingesetzt.

Diese Abbruchmaßnahmen waren aus pragmatischen Gründen notwendig, um zum einen die Testzeit von 2 Stunden nicht zu überschreiten und zum anderen extremen Ermüdungserscheinungen vorzubeugen.

Das Telepräsenzerleben wurde bestimmt über das Rating der beiden Telepräsenzfragen. Die mündliche Einschätzung der Zeitverzögerung wurde in ms erfasst.

Da hier ein unvollständiger Versuchsplan vorliegt, es sich jedoch um Messwiederholungsdaten handelt, wurden die Daten ipsativiert, d.h. von jedem Messwert wurde der individuelle Mittelwert abgezogen, so dass bei den Daten die Unterschiedlichkeit zwischen den Personen eliminiert ist. Dieses Verfahren ermöglicht es, eine Analyse für unabhängige Stichproben nach dem allgemeinen linearen Modell durchzuführen, ohne die Teststärke zu beeinträchtigen (Bortz, 2005, S. 335, Greer & Dunlap, 1997). Alle folgenden varianzanalytischen Berechnungen wurden mit diesen modifizierten Daten durchgeführt.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Die demographischen Daten der Versuchspersonen zeigten keine signifikante Korrelation mit den Leistungs- und Telepräsenzmaßen.

Die immersive Tendenz zeigte geringe Korrelationen von $r_{\text{Spearman}} = -.152$, $p = .422$ mit der Frage nach der Natürlichkeit der Interaktion und $r_{\text{Spearman}} = -.090$, $p = .636$ mit der Telepräsenzfrage, wie gut die Versuchspersonen sich in die entfernte Umgebung hineinversetzen konnten. Beide Korrelationen waren nicht signifikant. Die abgegebenen Ratings auf diese beiden Fragen waren somit unabhängig von der Persönlichkeitseigenschaft und können daher den Experimentalbedingungen zugeschrieben werden.

Die Versuchspersonen benötigten zwischen zwei und zehn Übungsdurchgänge, bis sie eines der beiden Abbruchkriterien erreichten. 23 erreichten das Kriterium, den Bajonettverschluss unter 30 s zu öffnen, sieben von ihnen fielen unter das zweite Kriterium, 25% der Anfangszeit zu benötigen. Hier ließen sich keine Zusammenhänge zu den abhängigen Variablen oder zu den demographischen Daten finden.

Die Gesamtmittelwerte sowie die zugehörigen Standardabweichungen der abhängigen Variablen über alle Verzögerungsstufen sind in Tabelle 4.45 dargestellt.

TABELLE 4.45. Deskriptive Statistiken der einzelnen abhängigen Variablen.

	Mittelwert	Standardabweichung
Zeit für Greifen [s]	40.22	34.67
Zeit für Bajonett öffnen [s]	80.53	55.69
Rating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	4.19	1.57
Rating 2 („sich hineinversetzt fühlen“)	4.68	1.44
Einschätzung der Zeitverzögerung [ms]	720.34	1013.11

Die Werte der abhängigen Variablen für die einzelnen Zeitverzögerungsbedingungen sind in Tabelle 4.46 aufgeführt, diejenigen für die Wave Impedance in der darauf folgenden Tabelle 4.47. Zur besseren Übersichtlichkeit werden nur die Mittelwerte dargestellt, der Bereich, in dem sich die Standardabweichungen bewegen, ist jeweils in der letzten Zeile angegeben.

TABELLE 4.46. Deskriptive Werte der abhängigen Variablen für die einzelnen Zeitverzögerungsbedingungen. Der Bereich der Standardabweichungen (SD-Range) findet sich in der letzten Zeile.

Verzögerungsstufen [ms]	Zeit für Greifen [s]	Zeit für Öffnen Bajonett [s]	Rating 1 (Natürlichkeit der Interaktion)	Rating 2 (sich hineinversetzt fühlen)	Einschätzung der Verzögerung [ms]	Häufigkeit Maximalzeit Greifen	Häufigkeit Maximalzeit Bajonett
0	19.30	33.54	5.26	5.43	226	0	0
50	22.81	45.24	4.94	5.41	255	0	1
100	24.63	57.15	4.67	5.17	442	0	0
150	39.52	70.57	4.46	4.69	543	0	2
200	41.80	76.01	4.09	4.68	747	0	1
250	35.47	81.02	4.01	4.51	778	0	1
300	58.37	100.32	4.12	4.49	1153	0	0
400	57.70	105.31	3.15	3.64	870	3	4
500	55.18	119.56	3.28	4.43	1572	0	3
600	76.70	209.81	2.47	3.45	1266	1	7
SD-Range	[31.31, 39.64]	[50.31, 63.68]	[1.42, 1.80]	[1.30, 1.65]	[915.14, 1061.23]		

Wie aus Tabelle 4.46 hervorgeht, nehmen die Zeit, die für das Greifen und diejenige, die für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses notwendig sind, deskriptiv mit zunehmender Zeitverzögerung zu, ebenso wie die Einschätzung der Zeitverzögerung. Die Telepräsenzratings nehmen dahingehend ab. Die Leistung und das Telepräsenzerleben werden schlechter. Ebenso wird die Häufigkeit des Erreichens der maximal erlaubten Zeit für die beiden Teilaufgaben mit höherer Zeitverzögerung größer.

TABELLE 4.47. Deskriptive Werte der abhängigen Variablen für die Wave-Impedance-Bedingungen. Die Werte in Klammern sind die Standardabweichungen.

Wave Impedance	Zeit für Greifen [s]	Zeit für Öffnen Bajonett [s]	Rating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	Rating 2 („sich hineinversetzt fühlen“)	Einschätzung der Verzögerung [ms]
niedrig	46.78 (37.37)	84.90 (60.04)	3.92 (1.70)	4.54 (1.55)	713.46 (1092.11)
mittel	34.08 (33.59)	70.95 (53.98)	4.27 (1.52)	4.70 (1.39)	789.70 (885.91)
hoch	40.49 (33.22)	85.66 (53.37)	4.34 (1.51)	4.78 (1.39)	663.42 (970.71)

Bei der Wave Impedance fällt auf, dass deskriptiv die Aufgabenleistung bei einem mittleren Betrag am besten ist, das Telepräsenzerleben jedoch bei einem hohen Betrag dieses Parameters. Hier scheint es also eine Divergenz zwischen Aufgabenleistung und Telepräsenzerleben zu geben.

2. Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Telepräsenzerleben

Es wurden Korrelationen über alle Durchgänge berechnet, um die Zusammenhänge zwischen den Variablen Zeit für das Greifen, Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses, Telepräsenzrating 1, Telepräsenzrating 2 und Einschätzung der Zeitverzögerung zu ermitteln.

Die beiden Maße für die Aufgabenleistung korrelierten im unteren Mittelbereich, $r = .418, p < .000, n = 324$. Die Aufgabentypen zeigen also etwas unterschiedliche Verläufe über die Bedingungen.

Zwischen den beiden Telepräsenzfragen bestand eine hohe Korrelation von $r_{\text{Spearman}} = .752, p < .000, n = 324$, sie entwickelten sich demnach sehr ähnlich über die Durchgänge hinweg. Jedoch war der Abfall des Ratings bei der ersten Frage nach der Natürlichkeit der Interaktion stärker als bei der Frage, wie gut sich die Probanden hineinversetzen konnten.

Die Einschätzung der Zeitverzögerung korrelierte im mittleren Bereich mit allen anderen abhängigen Variablen in die erwartete Richtung, so ergaben sich positive Korrelationen mit den Aufgabenleistungsmaßen Zeit für Greifen ($r = .231, p < .000, n = 324$) und für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses ($r = .419, p < .000, n = 324$), die Zeitverzögerung wurde also höher eingeschätzt, je länger man für die beiden Teilaufgaben brauchte. Mit den Telepräsenzratings ergaben sich negative Korrelationen im mittleren Bereich ($r_{\text{Spearman}} = -.431, p < .000, n = 324$ mit Rating 1 und $r_{\text{Spearman}} = -.321, p < .000, n = 324$ mit Rating 2); die Zeitverzögerung wurde mit abnehmendem Telepräsenzerleben höher eingeschätzt und umgekehrt.

Die Zeit für das Greifen korrelierte negativ im unteren Mittelbereich sowohl mit dem Telepräsenzrating 1 ($r_{\text{Spearman}} = -.267, p < .000, n = 324$) als auch mit dem Rating 2 ($r_{\text{Spearman}} = -.232, p < .000, n = 324$). Negative Korrelationen derselben Größenordnung zeigten auch die Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses mit dem Rating 1 ($r_{\text{Spearman}} = -.359, p < .000, n = 324$) und mit dem Telepräsenzrating 2 ($r_{\text{Spearman}} = -.282, p < .000, n = 324$).

Es gibt also eine mittelhohe Tendenz, dass die Zeit für die Beendigung der Aufgabe geringer wird, die Aufgabenleistung demnach mit zunehmendem Telepräsenzerleben besser wird. Auch hier ist die kausale Richtung ungeklärt.

3. Einfluss der unabhängigen Variablen auf Aufgabenleistung und Telepräsenzempfinden

Mittels einer multivariaten einfaktoriellen Varianzanalyse mit den ipsativierten Daten wurde zunächst nur für die Zeitverzögerungsstufe 0 ms untersucht, ob sich die drei gebildeten Gruppen, die die unterschiedlichen Blöcke der Zeitverzögerung zugewiesen bekommen hatten, bezüglich der Zeit für das Greifen, der Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses, den beiden Telepräsenzfragen sowie der Einschätzung der Zeitverzögerung unterscheiden. Der multivariate Effekt (berechnet über Pillais Spur-Kriterium) erwies sich als nicht signifikant, $F(10,168) = 1.26, n = 90, \eta^2 = .070, p = .258$. Die drei Gruppen unterschieden sich also nicht bezüglich der Aufgabenleistung, des Telepräsenzempfindens bzw. der Einschätzung der Zeitverzögerung.

Die Effekte der Zeitverzögerung und der Wave Impedance auf die abhängigen Variablen Zeit, die für das Greifen und Zeit, die für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses benötigt wird, die beiden Telepräsenzratings und die Einschätzung des Betrags der Zeitverzögerung, wurden mit einer mehrfaktoriellen multivariaten Varianzanalyse mit den ipsativierten Daten berechnet.

Es ergab sich ein signifikanter multivariater Haupteffekt der Zeitverzögerung, $F(45,1485) = 4.53, \eta^2 = .121, p < .000$, sowie ein signifikanter multivariater Haupteffekt

der Wave Impedance, $F(10,588) = 3.42$, $\eta^2 = .055$, $p < .000$. Die Interaktion zwischen Zeitverzögerung und Wave Impedance erwies sich als nicht signifikant, $F(75,1485) = 1.23$, $\eta^2 = .058$, $p = .093$. Die F-Statistiken wurden nach Pillais Spur-Kriterium berechnet.

Tabelle 4.48 zeigt die univariaten Haupteffekte für Zeitverzögerung und Wave Impedance.

TABELLE 4.48. Univariante Haupteffekte für Zeitverzögerung und Wave Impedance.

Quelle		df	F	η^2	p
zwischen Vpn (ipsative Daten)					
Zeit- verzögerung	Zeit für Greifen	9,297	12.38*	.273	< .000
	Zeit für Öffnen Bajonett	9,297	17.60*	.348	< .000
	Telepräsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	9,297	17.81*	.351	< .000
	Telepräsenzrating 2 („sich hineinversetzt fühlen“)	9,297	10.95*	.249	< .000
	Einschätzung der Zeitverzögerung	9,297	7.65*	.188	< .000
Wave Impedance	Zeit für Greifen	2,297	7.45*	.048	.001
	Zeit für Öffnen Bajonett	2,297	3.27*	.022	.039
	Telepräsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	2,297	8.75*	.056	< .000
	Telepräsenzrating 2 („sich hineinversetzt fühlen“)	2,297	3.90*	.026	.021
	Einschätzung der Zeitverzögerung	2,297	2.56	.017	.079

*signifikant auf $\alpha = 5\%$ -Niveau.

Wie aus Tabelle 4.48 ersichtlich wird, beeinträchtigte die Zeitverzögerung signifikant die Aufgabenleistung und das Telepräsenzemfinden. Ebenso zeigte sich ein signifikanter Effekt auf die Einschätzung der Zeitverzögerung.

Die Wave Impedance hatte ebenfalls eine signifikante Wirkung auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben, jedoch nicht auf die Einschätzung der Zeitverzögerung. Der mittlere Betrag der Wave Impedance führte dabei zur besten Aufgabenleistung, ein hoher Betrag zum höchsten Telepräsenzerleben. Die deskriptiv bereits genannte Divergenz darf also inhaltlich auch interpretiert werden. Hier scheint eine gute Aufgabenleistung nicht mit dem Telepräsenzerleben zu kovariieren. Dies ist ein Hinweis darauf, dass diese beiden Variablen nicht zwangsläufig zusammenhängen und andere zusätzliche Moderatorvariablen wie möglicher Weise die Bewertung der eigenen Leistung eine Rolle für den Zusammenhang spielen.

Es wurde erwartet, dass ein niedriger Betrag der Wave Impedance zu einer besseren Aufgabenleistung bei freier Bewegung, also hier beim Greifen, führt, ein hoher Betrag zu einer besseren Leistung bei Objektkontaktaufgaben, hier also beim Bajonett-Verschluss-Öffnen. Diese Erwartung konnte nicht bestätigt werden. Für beide Aufgabentypen erwies sich ein mittlerer Betrag als ideal, was dafür spricht, dass die Einstellung der Wave Impedance aufgabenunabhängig ist.

Der Effekt sollte sich mit Zeitverzögerung noch verstärken, was sich in einer Wechselwirkung zwischen Zeitverzögerung und Wave Impedance zeigen sollte. Diese Interaktion war nicht signifikant, was ein zusätzliches Indiz für die Aufgabenunabhängigkeit der Einstellung der Wave Impedance ist.

Die Zeitverzögerung zeigte alle erwarteten Effekte, die Hypothese H_{ZV1} , wonach sich dieser Parameter negativ sowohl auf die Aufgabenleistung als auch auf das Telepräsenzerleben auswirkt, konnte auch für konstante Zeitverzögerungen bestätigt werden. Abbildung 4.38 zeigt den Leistungsabfall bei der Zeit für das Greifen und bei der Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung.

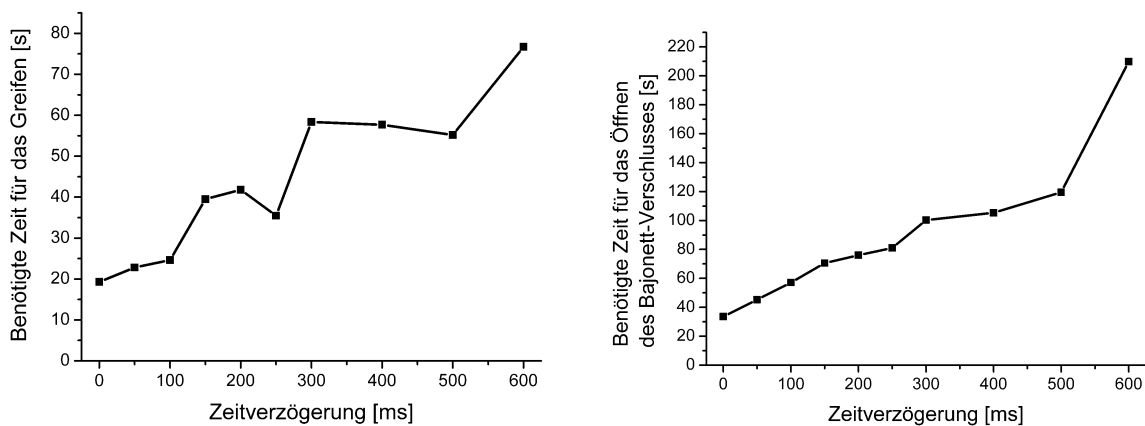


ABBILDUNG 4.38. Leistungsabfall für die Zeit für das Greifen (links) und für die Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses (rechts) in Abhängigkeit von den Zeitverzögerungsstufen.

Die Zeit beim Greifen nahm dabei insgesamt von 19.30 s um 57.40 s auf 76.70 s ab, was einem Performanzabfall von 397% entspricht. Beim Öffnen des Bajonett-Verschlusses war die Abnahme 176.27 s von 33.54 s bei einer minimalen Zeitverzögerung auf 209.81 s bei maximaler Zeitverzögerung, dies entspricht einer Verschlechterung der Leistung um 626%. Hier zeigt sich, dass sich die Zeitverzögerung stärker auf die Kontaktaufgaben (Öffnen des Bajonett-Verschlusses) als auf die freie Bewegung (Greifen) auswirkt. Dies entspricht den oben genannten Vorhersagen und bestätigt die Hypothese H_{ZV5} .

Die Abfallkurven für die beiden Telepräsenzratings in Abhängigkeit der Zeitverzögerungsstufen sind in Abbildung 4.39 dargestellt.

Insgesamt nahm bei der Telepräsenzfrage, wie natürlich die Interaktion mit der entfernten Umgebung empfunden wurde, das Rating von 5.26 auf 2.47 um 2.79 Punkte ab (entspricht einer Verschlechterung von 260%). Bei der zweiten Ratingfrage, wie gut sich die Probanden in die entfernte Umgebung hineinversetzen konnten, nahm das Rating von 5.43 auf 3.45 ab, was also bei der höchsten Zeitverzögerungsstufe um 1.98 erniedrigt, was einer Verschlechterung von 226% entspricht.

Auch hier zeigt sich also, dass – entgegen der Vorhersage in Hypothese H_{ZV4} – der zeitverzögerungsbedingte Abfall stärker bei der Aufgabenleistung als beim Telepräsenzerleben ist. Dies war auch schon bei der Untersuchung der Effekte der variablen Zeitverzögerung der Fall. Es könnte sich hier also um einen systematischen Effekt handeln.

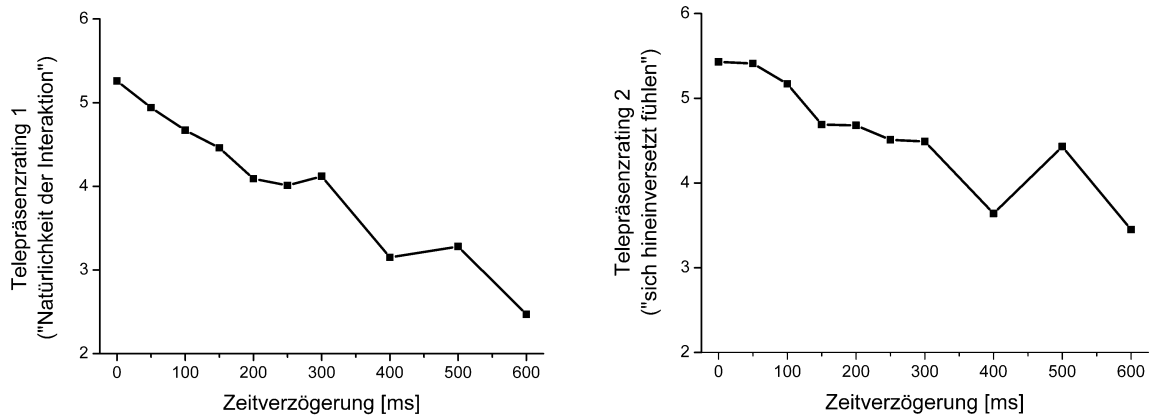


ABBILDUNG 4.39. Abfall des Telepräsenzratings 1 („Natürlichkeit der Interaktion“, links) sowie des Telepräsenzratings 2 („sich hineinversetzt fühlen“, rechts) in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung.

4. Güte der Einschätzung der Zeitverzögerung

In den vorangegangenen Analysen wurde bereits aufgeklärt, dass sich die Zeitverzögerung signifikant auf deren Einschätzung auswirkt, wobei mit zunehmender Verzögerung die Einschätzung zunahm.

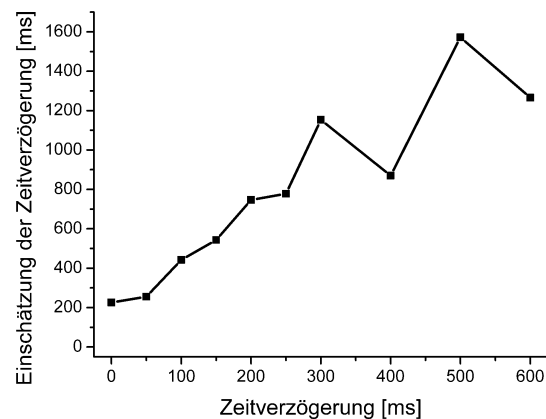


ABBILDUNG 4.40. Einschätzung der Zeitverzögerung in Bezug zur real vorhandenen Zeitverzögerung.

Für die Ermittlung der Güte der Einschätzung der Zeitverzögerung wurde eine einfaktorielles univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Messwiederholungsfaktor Zeitverzögerungsmodus mit den beiden Stufen „real vorhandene Zeitverzögerung“ und „Einschätzung der Zeitverzögerung“ und dem Gruppierungsfaktor Zeitverzögerungsstufen durchgeführt. Es zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt auf dem Faktor Zeitverzögerungsmodus, $F(1,314) = 80.15$, $\eta^2 = .203$, $p < .000$. Die Einschätzung der Zeitverzögerung durch die Versuchspersonen entsprach also nicht der realen

Zeitverzögerung. Die real vorhandene Zeitverzögerung wurde dabei systematisch überschätzt. Die Hypothese H_{ZV7} wurde demnach auch hier bestätigt. Abbildung 4.40 stellt diesen Sachverhalt graphisch dar.

5. Vergleich des vorliegenden Leistungsabfalls mit dem bei der variablen Zeitverzögerung

Im vorangegangenen Unterkapitel wurde die Studie zur Untersuchung variabler Zeitverzögerung vorgestellt. Dort betrug die Zeitverzögerung im Durchschnitt 360 ms. Der Leistungsabfall betrug dabei durchschnittlich 358%, die Abnahme beim Telepräsenzerleben 282%. In der Studie zu den Effekten von konstanter Zeitverzögerung war der Leistungsabfall bei der Verzögerungsstufe von 400 ms bei der Greifaufgabe 300%, bei der Aufgabe des Öffnens des Bajonett-Verschlusses 314%, der Abfall beim Telepräsenzerleben war hier im Durchschnitt 224%.

Dies zeigt, dass sowohl der Leistungsabfall als auch die Abnahme des Telepräsenzerlebens bei variabler Zeitverzögerung höher ist als bei konstanter Zeitverzögerung. Die Versuchspersonen konnten also variable Zeitverzögerung schlechter kompensieren, außerdem empfanden sie die variable Zeitverzögerung als unangenehmer als die konstante. Dies belegt die oben aufgestellte Hypothese H_{ZV2} .

Die Einschätzung der Zeitverzögerung war bei der variablen Verzögerung 869 ms, bei der 400ms-Stufe der konstanten Verzögerung 870 ms. Die Größenordnungen wurden von den Probanden also zwar falsch, jedoch konsistent eingeschätzt.

6. Kurvenverlauf in Abhängigkeit der Zeitverzögerung

Mittels Bonferroni-Test als Post-hoc-Test wurde für jedes Aufgabenleistungs- und Telepräsenzempfindensmaß ermittelt, welche Zeitverzögerungsstufen sich hier unterscheiden. Die folgende Tabelle 4.49 zeigt die Untergruppen für jede einzelne abhängige Variable.

TABELLE 4.49. Untergruppen der Zeitverzögerungsstufen für die einzelnen abhängigen Variablen.

	Untergruppe 1	Untergruppe 2	Untergruppe 3
Zeit für Greifen	0, 50, 100, 150 ms	200, 250, 300, 400, 500, 600 ms	
Zeit für Öffnen Bajonett	0, 50, 100, 150 ms	200, 250, 300, 400 ms	500, 600 ms
Telepräsenzrating 1	0, 50, 100 ms	150, 200, 250, 300 ms	400, 500, 600 ms
Telepräsenzrating 2	0, 50, 100 ms	150, 200, 250, 300 ms	400, 500, 600 ms

Die Einteilung der Untergruppen verläuft gemäß der Hypothese H_{ZV3} zum Verlauf. Bei beiden Aufgabenleistungsmaßen war die Zunahme der Verschlechterung bis 150 ms nicht signifikant, was den Vorhersagen gemäß den physiologischen und Informationsverarbeitungsprozessen entspricht (s. Kap. 4.4.1.). Bei den Ratings für das Telepräsenzerleben war die Abnahme bis 100 ms nicht signifikant, das Telepräsenzempfinden bricht also noch vor der Aufgabenleistung ein. Die Einteilung in drei Untergruppen entspricht ebenfalls den Vorhersagen, dass ab ca. 500 ms ein Bruch im Verlauf erfolgt. Auch hier findet der Bruch beim Telepräsenzerleben früher statt als bei der Aufgabenleistung. Lediglich bei der Zeit für das Greifen gibt es nur zwei Untergruppen,

möglicher Weise sind hier größere Zeitverzögerungen möglich, bis es zum Einbruch der Leistung kommt. Dafür spricht auch, dass der Leistungsabfall bei dieser Variablen nicht so steil verläuft wie bei der Zeit, die für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses benötigt wurde.

Es wurde dieselbe Kurvenanpassung wie bei den analysierten Studien in Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 für die Zeit, die für das Greifen sowie diejenige, die für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses benötigt wurde und für die beiden Telepräsenzratings durchgeführt. Die Zeitverzögerung fungierte wieder als unabhängige Variable.

Für alle abhängigen Variablen zeigte sich, dass die beste Kurvenanpassung jeweils durch eine quadratische Funktion beschrieben wurde. Die folgende Tabelle 4.50 gibt die quadratische Funktion sowie die tatsächlichen und vorhergesagten Werte für die Aufgabenleistungsmaße (AL) und die Telepräsenzratings (TPE) an.

TABELLE 4.50. Quadratische Funktion und tatsächliche und durch diese Funktion vorhergesagte Werte bei der Kurvenanpassung (ZV = Zeitverzögerung in ms). R^2 fungiert als Maß für die Anpassungsgüte.

Variable	Quadratische Funktion sowie tatsächliche und vorhergesagte Werte		
Zeit beim Greifen [s]	$AL = 18.435 + 0.112 \cdot ZV - 4 \cdot 10^{-5} \cdot ZV^2$; $R^2 = .890$		
	(normiert auf 100%: $AL = 100 + 0.549 \cdot ZV - 0.0002 \cdot ZV^2$; $R^2 = .889$)		
	Verzögerung [ms]	tatsächliche Werte [s]	vorhergesagte Werte [s]
	0	19.30	18.44
	50	22.81	23.94
	100	24.63	29.24
	150	39.52	34.34
	200	41.80	39.24
	250	35.47	43.94
	300	58.37	48.44
	400	57.70	56.84
	500	55.18	64.44
	600	76.70	71.24
Zeit beim Öffnen des Bajonett-Verschlusses [s]	$AL = 43.728 + 0.069 \cdot ZV + 0.0003 \cdot ZV^2$; $R^2 = .915$		
	(normiert auf 100%: $AL = 100 + 0.411 \cdot ZV + 0.0006 \cdot ZV^2$; $R^2 = .907$)		
	Verzögerung [ms]	tatsächliche Werte [s]	vorhergesagte Werte [s]
	0	33.54	43.73
	50	45.24	47.93
	100	57.15	53.63
	150	70.57	60.83
	200	76.01	69.53
	250	81.02	79.73
	300	100.32	91.43
	400	105.31	119.33
	500	119.56	153.23
	600	209.81	193.13

Variable	Quadratische Funktion sowie tatsächliche und vorhergesagte Werte		
Telepräsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“)	TPE = $5.181 - 0.005 \cdot ZV + 7 \cdot 10^{-7} \cdot ZV^2$; $R^2 = .957$		
	(normiert auf 100%: TPE = $100 - 0.100 \cdot ZV + 0.00003 \cdot ZV^2$; $R^2 = .955$)		
	Verzögerung [ms]	tatsächliche Werte [s]	vorhergesagte Werte [s]
	0	5.26	5.18
	50	4.94	4.93
	100	4.67	4.69
	150	4.46	4.45
	200	4.09	4.21
	250	4.01	3.97
	300	4.12	3.74
Telepräsenzrating 2 („sich hineinversetzt fühlen“)	TPE = $5.503 - 0.005 \cdot ZV + 3 \cdot 10^{-6} \cdot ZV^2$; $R^2 = .834$		
	(normiert auf 100%: TPE = $100 - 0.072 \cdot ZV + 0.00003 \cdot ZV^2$; $R^2 = .842$)		
	Verzögerung [ms]	tatsächliche Werte [s]	vorhergesagte Werte [s]
	0	5.43	5.50
	50	5.41	5.26
	100	5.17	5.03
	150	4.69	4.82
	200	4.68	4.62
	250	4.51	4.44
	300	4.49	4.27
400	3.64	3.98	
500	4.43	3.75	
600	3.45	3.58	

Betrachtet man die normierten Werte, stimmen diese in der Größenordnung mit denen der analysierten Studien in Kapitel 4.4.2. und 4.4.3. überein.

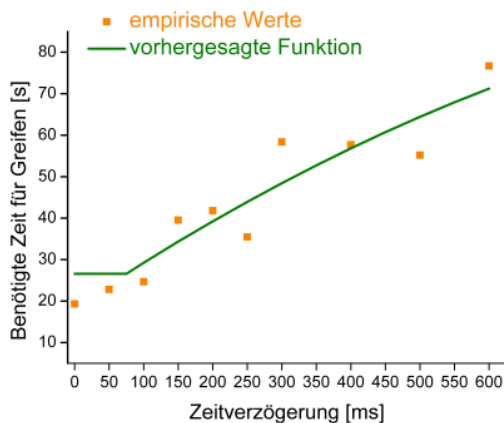
4.4.7. Psychologisches Modell zu den Effekten der Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden

Durch die vorangegangenen Analysen konnten die Vorhersagen der Hypothese H_{ZV3} bezüglich des Verlaufs des Leistungs- und Telepräsenzerlebensabfalls in Abhängigkeit von konstanter Zeitverzögerung bestätigt werden. Die Aufgabenleistung zeigt bis 150 ms einen linearen Verlauf mit der Steigung = 0, danach kann ein quadratischer Verlauf angenommen werden. Bei der Zeit, die für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses (constraint motion) benötigt wird, zeigt sich ab 500 ms ein linearer Verlauf mit einer Steigung > 0 .

Beim Telepräsenzerleben ist derselbe Verlauf zu erkennen, jedoch sind hier die Grenzen 100 ms und 400 ms.

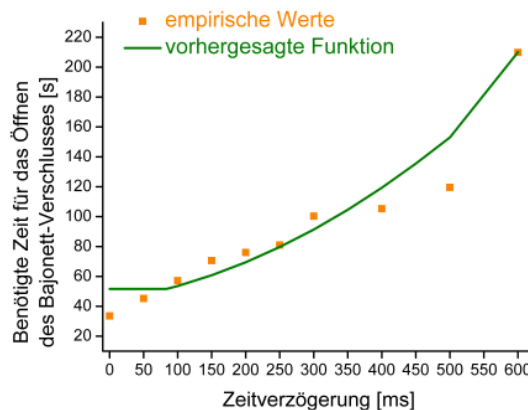
Die Hypothese H_{ZV3} und somit der theoretisch hergeleitete Verlauf der Aufgabenleistung und des Telepräsenzempfindens in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung gelten somit als bestätigt.

Die folgenden Abbildungen 4.41 (a) bis (d) stellen die gefundenen Verläufe graphisch dar. Zusätzlich sind die jeweiligen Formeln für die Verläufe angegeben.



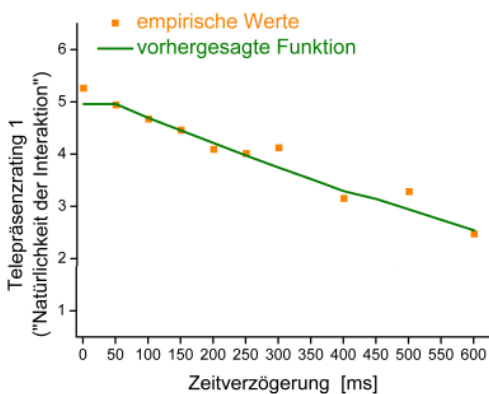
$$AL = \begin{cases} 26.565; 0 \leq ZV \leq 75\text{ms} \\ 18.435 + 0.112 \cdot ZV - 4 \cdot 10^{-5} \cdot ZV^2; 75\text{ms} < ZV \leq 600\text{ms} \end{cases}$$

(a)



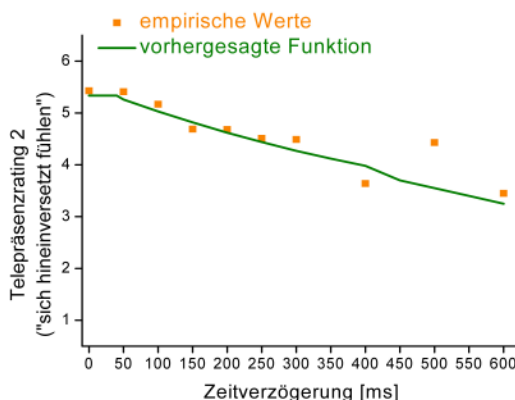
$$AL = \begin{cases} 51.625; 0 \leq ZV \leq 83\text{ms} \\ 43.728 + 0.069 \cdot ZV + 0.0003 \cdot ZV^2; 83\text{ms} < ZV < 500\text{ms} \\ -132 + 0.570 \cdot ZV; 500\text{ms} \leq ZV \leq 600\text{ms} \end{cases}$$

(b)



$$TPE = \begin{cases} 4.957; 0 \leq ZV \leq 50\text{ms} \\ 5.181 - 0.005 \cdot ZV + 7 \cdot 10^{-7} \cdot ZV^2; 50\text{ms} < ZV \leq 400\text{ms} \\ 4.939 - 0.004 \cdot ZV; 400\text{ms} < ZV \leq 600\text{ms} \end{cases}$$

(c)



$$TPE = \begin{cases} 5.337; 0 \leq ZV \leq 40\text{ms} \\ 5.503 - 0.005 \cdot ZV + 3 \cdot 10^{-6} \cdot ZV^2; 40\text{ms} < ZV \leq 400\text{ms} \\ 5.049 - 0.003 \cdot ZV; 400\text{ms} < ZV \leq 600\text{ms} \end{cases}$$

(d)

ABBILDUNG 4.41. Mittels Kurvenanpassung ermittelter Verlauf (a) für die Zeit, die für das Greifen benötigt wird; (b) für die Zeit, die für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses benötigt wird; (c) für Telepräsenzrating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“) und (d) für Telepräsenzrating 2 („sich hineinversetzt fühlen“).

4.4.8. Zusammenfassung zu den Untersuchungen der Effekte haptischer und visueller Zeitverzögerung und Gestaltungshinweise

In diesem Unterkapitel wurden zunächst physiologische und Informationsverarbeitungsprozesse behandelt, um die Auswirkungen von Zeitverzögerung auf den Menschen zu betrachten. Es wurde ermittelt, dass Zeitverzögerungen sehr früh (schon

unter 50 ms) wahrgenommen werden, eine Beeinträchtigung der Aufgabenleistung jedoch erst später, ab ca. 100 bis 200 ms, auftritt.

Anschließend wurden bereits existierende Studien zu den Auswirkungen von Zeitverzögerung auf die Aufgabenleistung und auf das Telepräsenzempfinden analysiert, um einen prinzipiellen Verlauf des Abfalls in der Aufgabenleistung und im Telepräsenzerleben zu ermitteln. Auf Grund der Ergebnisse dieser Studien wurde angenommen, dass sich ab 100 bis 200 ms ein quadratischer Zusammenhang zwischen Zeitverzögerung und Aufgabenleistung bzw. Telepräsenzempfinden zeigt und diese Funktion dann ab ca. 500 ms linear verläuft.

Um die getroffenen Annahmen zu überprüfen, wurden zwei Experimente durchgeführt. Das erste behandelte die Auswirkungen variabler Zeitverzögerung auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben, das zweite diejenigen von konstanter Zeitverzögerung.

Im Kapitel 4.4.4. wurde dazu eine Reihe von Grundhypothesen aufgestellt. Die folgende Tabelle 4.51 gibt eine Übersicht, inwiefern diese Hypothesen bestätigt werden konnten oder nicht.

TABELLE 4.51. Übersicht über die Grundhypothesen aus Kapitel 4.4.4. zur Zeitverzögerung von haptischen und visuellen Daten.

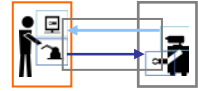
Hypothesen		Erläuterung
H_{ZV1} : Zeitverzögerungen im haptischen und visuellen Kanal beeinträchtigen sowohl Aufgabenleistung als auch Telepräsenzempfinden.	bestätigt	Es konnte in beiden Studien gezeigt werden, dass Zeitverzögerungen sowohl die Aufgabenleistung als auch das Telepräsenzerleben signifikant verschlechterten.
H_{ZV2} : Variable Zeitverzögerung zeigt einen stärker negativen Effekt auf Aufgabenleistung und Telepräsenzerleben als konstante Zeitverzögerung.	bestätigt	Bei der variablen Zeitverzögerung (\emptyset 360 ms) zeigte sich ein Leistungsabfall von 358% und eine Verschlechterung des Telepräsenzempfindens um 282%. Bei der entsprechenden Stufe der konstanten Zeitverzögerung (400 ms) lag der durchschnittliche Leistungsabfall bei 307%, die Verschlechterung des Telepräsenzerleben bei 224%.
H_{ZV3} : Für konstante Zeitverzögerungen zeigt sich der angenommene Verlauf (linear mit Steigung = 0 bis 100-200 ms, quadratisch bis ca. 500 ms, danach linear mit Steigung > 0).	bestätigt	Bei der Studie zur konstanten Zeitverzögerung wurde für die Aufgabenleistung bis 150 ms ein linearer Verlauf mit Steigung = 0 ermittelt, bis 500 ms ein quadratischer Verlauf, danach bei der Objektkontaktaufgabe ein linearer Verlauf mit Steigung > 0. Beim Telepräsenzerleben zeigte sich derselbe Verlauf mit den Grenzen 100 und 400 ms.
H_{ZV4} : Zeitverzögerung hat einen stärkeren Effekt auf das Telepräsenzerleben als auf die Aufgabenleistung.	nicht bestätigt	Bei der variablen Zeitverzögerung verschlechterten sich die Leistung um 460 bzw. 255%, das Telepräsenzerleben jedoch um 322 bzw. 241%. Bei der konstanten Zeitverzögerung betrug der Leistungsabfall 397 bzw. 626%, das Telepräsenzerleben verschlechterte sich um 260 bzw. 226%. Die Zeitverzögerung zeigte also einen stärkeren Effekt auf die Aufgabenleistung als auf das Telepräsenzempfinden. Allerdings bricht das Telepräsenzerleben bei einer etwas geringeren Zeitverzögerung (150 ms) ein als die Aufgabenleistung (200 ms).

Hypothesen		Erläuterung
H_{ZV5} : Zeitverzögerung hat einen stärker negativen Effekt auf Kontaktaufgaben (constraint motion) als auf Aufgaben mit freier Bewegung (free-space-motion).	bestätigt	In der Studie zur konstanten Zeitverzögerung zeigte sich zeitverzögerungsbedingt eine höhere Verschlechterung bei der Zeit für das Öffnen des Bajonett-Verschlusses (constraint motion, Abfall 626%) als bei der Zeit für das Greifen (free-space-motion, Abfall 397%).
H_{ZV6} : Die Einstellung bzw. zusätzliche Implementierung physikalischer Parameter führt dazu, dass Zeitverzögerungen besser kompensiert werden können.	teilweise bestätigt	Die variable Zeitverzögerung konnte durch die Simulation von zusätzlicher Trägheit nicht kompensiert werden. Bei der konstanten Zeitverzögerung zeigte sich jedoch ein Kompensationseffekt bei der Einstellung der Wave Impedance. Es scheint, als gäbe es diese Kompensation nur für bestimmte physikalische Parameter wie Dämpfung und Nachgiebigkeit, nicht jedoch für Trägheit.
H_{ZV7} : Zeitverzögerungen werden von Probanden schlecht eingeschätzt, insbesondere werden diese systematisch überschätzt.	bestätigt	In beiden Studien schätzten die Versuchspersonen die vorhandene Zeitverzögerung signifikant falsch ein, zudem überschätzten sie diese systematisch.

Bis auf die Hypothese **H_{ZV4}** konnten alle anderen Grundhypothesen bestätigt bzw. teilweise bestätigt werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Zeitverzögerungen schon sehr früh wahrgenommen werden, was durch die Einschätzung der Zeitverzögerung der Probanden angedeutet wird. Jedoch wird das Telepräsenzempfinden erst ab einer höheren Zeitverzögerungsstufe beeinträchtigt, hier ab 150 ms. Die Aufgabenleistung brach erst nach dem Abfall beim Telepräsenzerleben ein, hier ab 200 ms.

Für Telepräsenzsysteme mit totzeitbehafteter Datenübertragung lässt sich ableiten, dass bei manipulativen Aufgaben eine Zeitverzögerung von haptischen und visuellen Daten von bis zu 200 ms noch keine wesentliche Beeinträchtigung der Aufgabenleistung des Benutzers nach sich zieht. Ebenso können selbst schwierige Aufgaben auch mit Zeitverzögerungen bis 600 ms durchgeführt werden, wobei jedoch ein beträchtlicher Leistungsabfall zu verzeichnen ist. Treten variable Zeitverzögerungen auf, sollten diese synthetisch z.B. durch Puffer teilweise erhöht werden, um eine konstante Totzeit zu erreichen, da variable Zeitverzögerungen schlechter als konstante kompensiert und höhere Totzeiten bei konstanter Zeitverzögerung toleriert werden können. Zusätzlich ist es möglich, durch synthetisch eingeführten Dämpfung bzw. Nachgiebigkeit die negativen Effekte von Zeitverzögerungen abzumildern. Bei Telepräsenz Anwendungen mit totzeitbehafteter Kommunikation sollte daher eine synthetische Dämpfung implementiert werden.



5. Einfluss von Persönlichkeitsvariablen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben

In diesem Kapitel wird der Einfluss von Persönlichkeitsvariablen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben untersucht. Im Kapitel 2 dieser Arbeit wurde dargelegt, dass vor allem affektive und motivationale Komponenten einen Einfluss auf das Präsenzerleben ausüben.

Die Höhe des Präsenzerlebens wurde mittels Prozessen der Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen erklärt. Daher werden zunächst die Einflüsse von Aufmerksamkeitsprozessen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzerleben theoretisch analysiert. Da bei der Variablen Übung bzw. Erfahrung sehr inkonsistente Ergebnisse in der Literatur auftraten, soll diese Variable näher beleuchtet werden. Weiterhin werden motivationale Effekte auf das Präsenzerleben, insbesondere die der Leistungsmotivation und der Involviertheit, untersucht. Die Adaptationsfähigkeit, deren Einfluss auf das Präsenzerleben zufällig von Slater & Usoh (1993c) entdeckt wurde, wird ebenfalls erforscht. Da hier kein Messinstrument vorliegt, wurde ein eigener Test konstruiert. Ferner wird der Einfluss der Konzentrationsfähigkeit auf das Präsenzerleben analysiert.

Im Anschluss an die theoretische Behandlung dieser Konzepte wird das postulierte Gesamtmodell vorgestellt. Dieses wurde in zwei Untersuchungen überprüft. Für die Messung der Konstrukte Leistungsmotivation, Konzentrationsfähigkeit, immersive Tendenz und Adaptabilität wurden jeweils validierte Fragebogentests eingesetzt.

5.1. Theoretische Grundlagen

Anknüpfend an Kapitel 2 dieser Arbeit werden zunächst theoretisch angenommene Einflüsse der einzelnen Persönlichkeitsvariablen auf das Präsenzerleben und die Aufgabenleistung erörtert.

5.1.1. Einfluss von Aufmerksamkeitsprozessen auf das Präsenzerleben und die Aufgabenleistung

Nach Draper, Kaber & Usher (1998) kommt das Präsenzerleben zustande durch das Verhältnis der Zuweisung der Aufmerksamkeitsressourcen auf die vermittelte Umgebung an den zur Verfügung stehenden Gesamtressourcen, d.h.

$$\text{Präsenzerleben} \approx \frac{\text{Aufmerksamkeitsressourcen (vermittelte Umgebung)}}{\text{Aufmerksamkeitsressourcen (gesamt)}}$$

Die Gesamtressourcen bestehen aus Aufmerksamkeitsressourcen, die auf die vermittelte Umgebung gerichtet sind, und Ressourcen, die auf die aktuelle Umwelt verteilt werden.

Die Aufgabenleistung hingegen wird veranlasst durch die Aufmerksamkeitsressourcen, die auf die Aufgabe in der vermittelten Umgebung gerichtet werden.

Dem Präsenzempfinden und der Aufgabenleistung gemeinsam zugrunde liegend sind demnach die Aufmerksamkeitsressourcen, die auf die Aufgabe in der vermittelten Umgebung gerichtet sind. Abbildung 5.01 stellt dies graphisch dar.

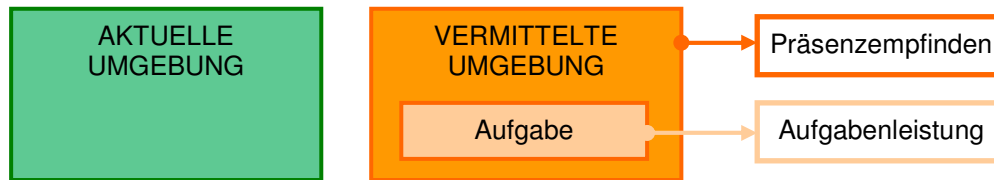


ABBILDUNG 5.01. Schematische Darstellung der am Präsenzempfinden und an der Aufgabenleistung beteiligten Aufmerksamkeitsressourcen. Die farbigen Rechtecke stellen die Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen bei jeweils hoher Ausprägung von Präsenzempfinden und Aufgabenleistung dar.

Bei Richtigkeit dieser Annahme mindern Störungen aus der aktuellen Umgebung wie beispielsweise Geräusche aus dem Experimentallabor sowohl das Präsenzempfinden als auch die Aufgabenleistung, da Aufmerksamkeitsressourcen aus der vermittelten Umgebung abgezogen und vermehrt auf die aktuelle Umgebung gerichtet werden. Dieser Effekt wurde in empirischen Untersuchungen bereits bestätigt (Slater & Usoh, 1993a; Slater & Steed, 2000; Nichols, Haldane & Wilson, 2000; Schubert, Friedmann & Regenbrecht, 2001; Brogni, Slater & Steed, 2003; Brogni, Vinayagamoorthy, Steed & Slater, 2005).

Störungen und Irritationen innerhalb der vermittelten Umgebung hingegen sollten die Aufmerksamkeitsressourcen zwar von der Aufgabe abziehen, jedoch sollten diese weiterhin auf die vermittelte Umgebung gerichtet sein. Als Konsequenzen bleibt das Präsenzempfinden gleich, wohingegen die Aufgabenleistung abnimmt. Dieser Gesichtspunkt wurde empirisch bislang nicht untersucht.

5.1.2. Einfluss der Übung auf das Präsenzempfinden

Nach Heeter (2001) dämpft Unvertrautheit bzw. Ungeübtheit mit einer vermittelten Umgebung das Präsenzempfinden. Eine zunehmende Vertrautheit mit dem System bzw. Geübtheit mit der Aufgabe erhöht das Präsenzempfinden, nach weiterer Übung fällt durch die eintretende Eintönigkeit resp. Automatisiertheit das Präsenzempfinden wieder ab. Der von Heeter (2001) vermutete anfängliche Anstieg im Präsenzempfinden mit zunehmender Übung wurde empirisch auch aufgefunden (Anderson, Ashraf, Douthier & Jack, 2001; Marsh, 2001).

Allerdings wurde empirisch ebenso ein Abstieg oder eine Gleichförmigkeit im Präsenzempfinden mit zunehmender Übung beobachtet (Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2001; Meehan, Razaque, Insko, Whitton & Brooks, 2005; Retaux, 2003; Welch, Blackmon, Liu, Mellers & Stark, 1996; Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy, 2002; s. Kap. 2).

Diese inkonsistenten Ergebnisse sind ein Hinweis darauf, dass es hier interindividuelle Unterschiede bezüglich des Effekts der Übung auf das Präsenzempfinden oder andere Drittvariablen gibt, die den Effekt moderieren.

Betrachtet man die zugewiesenen Aufmerksamkeitsressourcen, ist denkbar, dass ein Teil der ungeübten Benutzer zu Anfang mehr Aufmerksamkeitsressourcen auf die aktuelle Umgebung, insbesondere auf die Handhabung des Ein-/Ausgabegeräts oder auf die Displaydarstellung richtet. Mit zunehmender Vertrautheit mit dem System werden dann Ressourcen frei, die auf die vermittelte Umgebung gerichtet werden können. Andere Benutzer kommen möglicher Weise schneller mit der Handhabung der Geräte und der Displaydarstellung zurecht, so dass keine bzw. weniger Dämpfung des Präsenzepfindens durch den Abzug von Aufmerksamkeitsressourcen in die aktuelle Umgebung stattfindet. Diese Differenzierung wurde noch nicht erforscht.

Für die Aufgabenleistung wird angenommen, dass mit zunehmender Übung eine Verbesserung der Aufgabenleistung stattfindet, die dem Potenzgesetz der Übung folgt (s. auch Kap. 4.4.6.).

5.1.3. Einfluss der Leistungsmotivation und der Konzentrationsfähigkeit auf das Präsenzepfinden

Die Leistungsmotivation bezeichnet die Gesamtheit der Determinanten des leistungsmotivierten Verhaltens. Nach Heckhausen (1989) ist die Leistungsmotivation die resultierende Tendenz eines emotionalen Konflikts zwischen den Grundtendenzen der Annäherung (Hoffnung auf Erfolg) und Vermeidung (Furcht vor Misserfolg). Zu den Dimensionen der Leistungsmotivation gehören Zielsetzung, Beharrlichkeit, Antriebsstärke, Erfolgshoffnung und Misserfolgsbefürchtung (Atkinson & Feather, 1966; Cassidy & Lynn, 1989). In einer Metaanalyse konnten Scholz & Schuler (1993) zeigen, dass Leistungsmotivation deutlich höher mit dem Assessment-Center-Gesamtwert korreliert als jede der Persönlichkeitsdimensionen des Fünffaktorenmodells von McCrae & Costa (1983, s. Kap. 2.4.1.).

Daher wird angenommen, dass die Leistungsmotivation einer Person die Aufmerksamkeitszuweisung bei der Erfüllung einer Aufgabe in einer vermittelten Umgebung mitbestimmt. Dies sollte sich vor allem dann bemerkbar machen, wenn die Aufgabe nach exzessiver Übung eintönig ist bzw. automatisiert erfolgt. Wenn die Leistungsmotivation niedrig ist, dann wird auf Grund der fehlenden Beharrlichkeit bei einer langweiligen Aufgabe in einer vermittelten Umgebung die Aufmerksamkeit zunehmend der aktuellen und immer weniger der vermittelten Umgebung zugewiesen, das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung sollten dann absinken.

Eine hohe Leistungsmotivation reicht jedoch nicht aus, um den Fokus der Aufmerksamkeit auf der vermittelten Umgebung zu halten. Dann spielt zusätzlich eine Rolle, ob der Benutzer auch fähig ist, den Aufmerksamkeitsfokus bei eintönig gewordener Aufgabe auf diese und die vermittelte Umgebung aufrecht zu erhalten. Ein wichtiger Gesichtspunkt stellt dann die Konzentrationsfähigkeit, also die Belastbarkeit der Aufmerksamkeit, dar. Nach Brickenkamp & Karl (1986) ist Konzentration „eine leistungsbezogene, kontinuierliche und fokussierende Reizelektion, die Fähigkeit eines Individuums, sich bestimmten (aufgaben-) relevanten internen oder externen Reizen selektiv, d.h. unter Abschirmung gegenüber irrelevanten Stimuli, ununterbrochen zuzuwenden und diese schnell und korrekt zu analysieren“ (S. 195).

Wenn also bei einer gut geübten Aufgabe die Leistungsmotivation hoch ist, sollte der Großteil der Aufmerksamkeitsressourcen auf die vermittelte Umgebung gerichtet sein. Ist dabei die Konzentrationsfähigkeit gering, wird der Aufmerksamkeitsfokus auf aufgabenirrelevante Aspekte in der vermittelten Umgebung verschoben. Unter Abnahme der Aufgabenleistung bleibt dann das Präsenzepfinden gleich bzw. wird erhöht, da dieses durch die Aufmerksamkeitszuweisung auf die gesamte vermittelte Umgebung bestimmt wird. Ist dagegen die Konzentrationsfähigkeit hoch, bleibt der Aufmerksamkeitsfokus auf der Erfüllung der Aufgabe. Abgesehen von Ermüdungserscheinungen sollten hier sowohl das Präsenzerleben als auch die Aufgabenleistung entsprechend höher sein. Hierzu gibt es noch keine systematischen Studien.

5.1.4. Einfluss der Involviertheit auf das Präsenzepfinden

Die Involviertheit einer Person bezeichnet die persönliche Beteiligung an einem Thema und dessen persönliche Relevanz (Sansone & Harackiewicz, 2000). Die Involviertheit bestimmt das Engagement, mit dem eine Aufgabe ausgeführt wird und ist manipulierbar über Belohnungen oder positive Ergebnisse (Weinert, 1998, S. 133 ff.).

In der Literatur wurde bisher stets ein positiver Beitrag der Involviertheit auf das Präsenzepfinden berichtet (Schubert, Friedmann & Regenbrecht, 2001; Lessiter, Freeman, Keogh & Davidoff, 2001; Jerome & Witmer, 2002; Renaud, Chartier, Albert, Decaire, Cournoyer & Bouchard, 2007; s. Kap. 2). Die Involviertheit einer Person kann durch entsprechende Instruktionen oder Belohnung manipuliert werden (Weinert, 1998, S. 135).

Es erscheint plausibel anzunehmen, dass ein hohes Ausmaß an Involviertheit zu einer erhöhten Motivation führt und somit individuelle Ausprägungen in der Leistungsmotivation, die nur in einem geringen Umfang beeinflusst werden kann, überdeckt werden können. Die Prüfung dieser Annahme steht bisweilen noch aus.

5.1.5. Einfluss der Adaptationsfähigkeit auf das Präsenzepfinden

Die Adaptabilität bezeichnet die Geschwindigkeit, mit der sich Personen an neue Umstände anpassen können (Slater & Usoh, 1993c). Nach Pulakos, Schmitt, Dorsey, Arad, Hedge & Borman (2002) wird die Anpassung an neue Reizverhältnisse sehr breit gefasst, von der Anpassung an eine neue Arbeitsgruppe, an eine neue Stadt, an soziale Interaktionen bis hin zur Anpassung an ein neues Problem mittels modifizierter Problemlösestrategien. Während die Variable Übung die Anpassung an die Aufgabenerfordernisse kennzeichnet, ist der Begriff der Adaptationsfähigkeit weiter gefasst. Hier geht es vor allem um aufgabenirrelevante Aspekte wie die Umgebung und andere Rahmenbedingungen.

In der Forschung zum Beitrag dieses Konstrukts auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung sind kaum Studien zu finden.

Die Auswirkung der Anpassungsfähigkeit auf das Präsenzepfinden wurde eher zufällig von Slater & Usoh (1993c) entdeckt. Sie fanden einen hohen negativen Zusammenhang zum Präsenzepfinden, d.h. Benutzer, die sich nur schlecht an neue Umstände anpassen konnten, wiesen ein hohes Präsenzepfinden auf bzw. Benutzer mit einer guten Anpassungsfähigkeit hatten ein niedrigeres Präsenzepfinden. Diese negative Korrelation kann erklärt werden, wenn die Verlaufskurven des Präsenzepfindens bei hoch und gering anpassungsfähigen

Personen mit zunehmenden Übungsdurchgängen betrachtet werden. Im Unterkapitel 5.1.2. wurde dargelegt, dass das Präsenzempfinden mit zunehmender Übung ansteigt oder abfällt und nach Erreichen von Automatisiertheit bei der Aufgabenausführung die gegenläufige Tendenz zeigt. Bei hoch anpassungsfähigen Benutzern wird das Maximum bzw. Minimum des Präsenzempfindens früher erreicht, schlägt dadurch auch früher die gegenläufige Tendenz beim Präsenzempfinden ein, als bei gering anpassungsfähigen Benutzern. Dadurch ist die Absoluthöhe des Präsenzempfindens über die gesamte Anzahl von Übungsdurchgängen bei hochadaptiblen Personen geringer als bei gering anpassungsfähigen Benutzern. Abbildung 5.02 stellt diesen Sachverhalt beispielhaft dar.

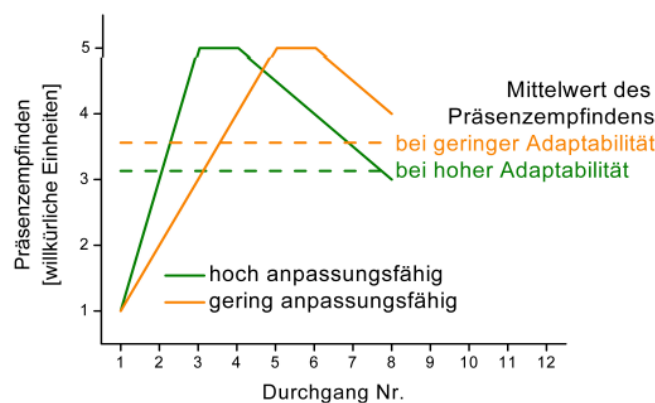


ABBILDUNG 5.02. Beispielhafte Darstellung zur Erklärung der negativen Korrelation zwischen Anpassungsfähigkeit und Präsenzempfinden. Durch den geringeren Betrag der Steigung bei geringer Adaptabilität wird der Mittelwert höher als bei hoher Adaptabilität.

Eine hohe Anpassungsfähigkeit führt zu einer schnelleren Gewöhnung an die Umgebung und somit zu einer schnelleren Vertrautheit mit aufgabenirrelevanten Rahmenbedingungen. Deshalb sollten sich aufgabenirrelevante und aufgabenrelevante Störungen innerhalb einer vermittelten Umgebung unterschiedlich auf das Präsenzempfinden von Benutzern mit verschiedenem Ausprägungsgrad an Anpassungsfähigkeit auswirken. Hoch anpassungsfähige Benutzer haben genügend Kapazitäten frei, um auf aufgabenirrelevante Inkonsistenzen innerhalb einer vermittelten Umgebung zu achten, während gering anpassungsfähige Personen ihre Kapazitäten noch einsetzen müssen, um sich die Rahmenbedingungen einer vermittelten Umgebung einzuprägen. Daher sollten sich aufgabenirrelevante Irritationen in einer vermittelten Umgebung stärker auf hochadaptible Benutzer auswirken als auf gering anpassungsfähige Operatoren. Diese Annahme muss jedoch noch empirisch überprüft werden. Weiterhin wird kein Einfluss der Adaptationsfähigkeit auf die Aufgabenleistung erwartet.

5.1.5.1. Konstruktion und Validierung eines Fragebogens zur Anpassungsfähigkeit

Da es für die Adaptationsfähigkeit kein verfügbares Messinstrument gibt, wurde ein selbsterstellter Fragebogen konstruiert und validiert. In Anlehnung an Pulakos, Schmitt, Dorsey, Arad, Hedge & Borman (2002) wurden Fragen zur Anpassung an eine neue

Umgebung, an neue Problemstellungen und an soziale Interaktionen konstruiert. Dabei wurde darauf geachtet, Verneinungen und insbesondere doppelte Verneinungen, unverständliche Ausdrücke und verbundene Inhalte innerhalb eines Items zu vermeiden. Die Items bestanden aus der Schilderung von Situationen, die jeweils eine bestimmte Handlungsweise erfordern, z.B. „Auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren.“. Dabei sollte dann angegeben werden, mit welcher Geschwindigkeit die genannte Handlungsweise subjektiv auf die jeweilige Person zutrifft. Insgesamt wurden 28 Items entwickelt, die auf einer fünfstufigen Ratingskala von langsam bis schnell beantwortet werden sollten, um die Anpassungsgeschwindigkeit zu erfassen.

Die Eichstichprobe bestand aus 97 Versuchspersonen im Alter zwischen 19 und 63 Jahren (Mittelwert 23.78 Jahre, Standardabweichung 5.94 Jahre). Davon waren 24 Personen weiblich und 73 männlich.

Die Werte wurden von -2 für die Antwort „langsam“ bis $+2$ für „schnell“ kodiert. Die Werte wurden über alle Items zu einem Gesamtscore summiert. Der Mittelwert über alle aufsummierten 28 Fragen betrug 13.20 mit einer Standardabweichung von 8.54 (Mittelwert der Einzelfragen 0.47). Dies zeigt, dass der Mittelwert der Einzelfragen (Erwartungswert 0) in den positiven Bereich verschoben ist. Ein nachfolgender χ^2 -Test zur Prüfung der Normalverteilung über den Gesamtscore ergab, dass die Werte um diesen verschobenen Wert normalverteilt waren, $\chi^2(37) = 46.77, p = .130$.

Zur Reliabilitätskontrolle wurde die interne Konsistenz, d.h. die Korrelation jedes Items mit dem Gesamtmittelwert, berechnet. Cronbachs α betrug hier .74. Acht Items zeigten eine Korrelation mit dem Gesamtscore von unter 0.2, aufgrund dieser geringen Trennschärfe wurden diese Items eliminiert.

Der Mittelwert über die verbleibenden aufsummierten 20 Fragen betrug 9.40 mit einer Standardabweichung von 7.24 (Mittelwert der Einzelfragen 0.47). Neben der Verschiebung des Mittelwerts zeigte sich auch hier, dass der Gesamtscore einer Normalverteilung folgt, $\chi^2(31) = 43.21, p = .071$.

Mit dem verbleibenden Datensatz wurde ein Cronbachs α und damit eine Reliabilität von .76 ermittelt. Die nach Spearman-Brown berechnete Validität belief sich auf $r_{tt} = .80$.

Dieser Persönlichkeitsfragebogen wies somit eine hohe Reliabilität und Validität auf und kann in den folgenden Analysen verwendet werden. Der Endfragebogen mit den 20 Items nebst den Kennwerten für die interne Konsistenz ist im Anhang C zu finden.

5.2. Erstellung des Gesamtmodells zum Einfluss von Persönlichkeitsvariablen auf das Präsenzempfinden und die Aufgabenleistung und Hypothesen

Zusammenfassend aus den theoretischen Grundlagen lässt sich das Gesamtmodell erstellen, das in Abbildung 5.03 dargestellt ist.

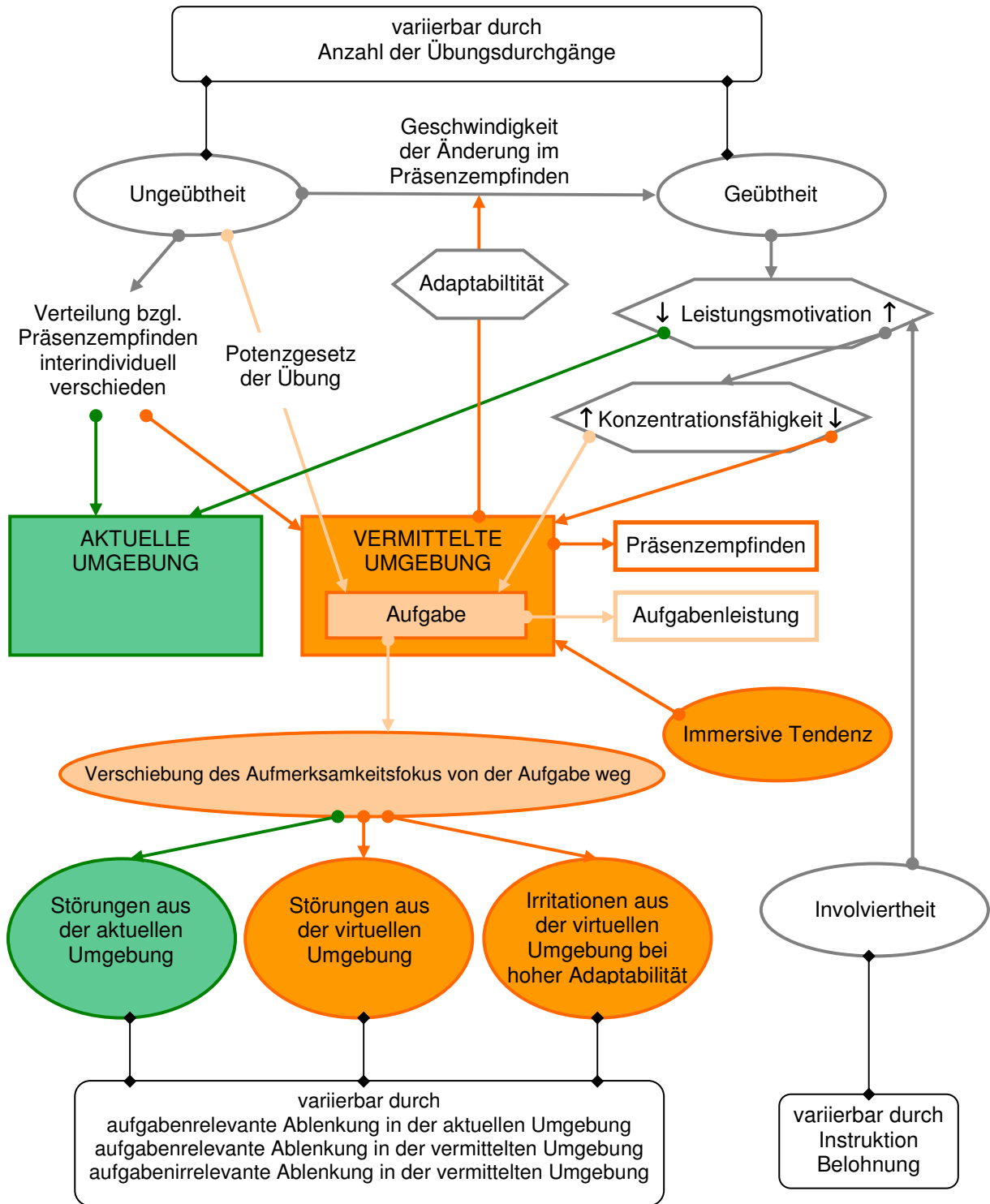


ABBILDUNG 5.03. Gesamtmodell zum Einfluss der betrachteten Persönlichkeitsvariablen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung. Die Pfeile stellen die Verteilung von Aufmerksamkeitsressourcen dar.

Aus dem Gesamtmodell und basierend auf der Annahme der Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen ergeben sich die folgenden Hypothesen:

- H_{Pers1}**: Mit zunehmender Anzahl an Übungsdurchgängen verändert sich das Präsenzepfinden. Insbesondere ergeben sich zwei Gruppen von Versuchspersonen, bei denen das Präsenzepfinden entweder absinkt oder ansteigt.
- H_{Pers2}**: Mit zunehmender Anzahl an Übungsdurchgängen folgt die Aufgabenleistung, insbesondere die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, dem Potenzgesetz der Übung.
- H_{Pers3}**: Bei gut geübter Aufgabe und niedriger Leistungsmotivation verschlechtern sich das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung.
- H_{Pers4}**: Bei gut geübter Aufgabe und hoher Leistungsmotivation ändert sich das Präsenzepfinden nicht bzw. wird erhöht. Ist zusätzlich die Konzentrationsfähigkeit gering, sinkt die Aufgabenleistung, ist diese hoch, bleibt die Aufgabenleistung gleich.
- H_{Pers5}**: Bei hoher Adaptationsfähigkeit ist die Veränderung im Präsenzepfinden, die mit zunehmender Übung einhergeht, stärker als bei niedriger Adaptationsfähigkeit.
- H_{Pers6}**: Die Variation der Involviertheit zeigt dieselben angenommenen Effekte wie die Variation der Leistungsmotivation unabhängig von deren individueller Ausprägung.
- H_{Pers7}**: Störungen aus der aktuellen Umgebung mindern die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden.
- H_{Pers8}**: Aufgabenrelevante Störungen aus der vermittelten Umgebung mindern die Aufgabenleistung, nicht jedoch das Präsenzepfinden.
- H_{Pers9}**: Aufgabenirrelevante Störungen (Irritationen) aus der vermittelten Umgebung wirken sich nur bei Personen mit einer hohen Anpassungsfähigkeit mindernd auf die Aufgabenleistung, nicht jedoch auf das Präsenzepfinden, aus.
- H_{Pers10}**: Die immersive Tendenz hat einen positiven Einfluss auf das Präsenzerleben.

Da es sich hier um komplexe Hypothesen handelt, werden diese in zwei separaten Studien untersucht. Zunächst wird die Aufgabe, die in der virtuellen Umgebung zu erfüllen war, vorgestellt, danach werden die beiden Untersuchungen zur Prüfung der Hypothesen beschrieben.

5.3. Standardapparatur und –verfahren

Zur Überprüfung der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Hypothesen wurde eine Aufgabe in einer virtuellen Umgebung realisiert. Das PHANTOM Omni der Firma SensAble Technologies Inc. als haptisches Ein-/Ausgabegerät verwendet. Die visuelle Rückmeldung erfolgte über einen 19“-TFT-Monitor.

Die Aufgabe wurde selbst programmiert und bestand darin, virtuelle Klötze, deren Anfangsposition immer die gleiche war, zu einem festgelegten Gebäude, hier einer Stadtmauer, zusammenzubauen. Als haptische Rückmeldung folgten die virtuellen Klötze den Gesetzen der Schwerkraft und es wurde eine Masse für jeden Baustein simuliert und über das PHANTOM rückgemeldet. Um die Aufgabe anspruchsvoller zu gestalten, wurden Kontaktkräfte zwischen den Bausteinen nicht dargestellt, dadurch war eine feinere motorische Justierung der Bausteine, die zusätzlich ein hohes Maß an visueller Rückmeldung erforderte, notwendig. Abbildung 5.04 zeigt die Ist- und die Sollposition der Bauklötze. Die virtuellen

Steine wurden wieder in den Anfangszustand zurückgesetzt, wenn die Versuchspersonen angaben, die Sollposition erreicht zu haben.

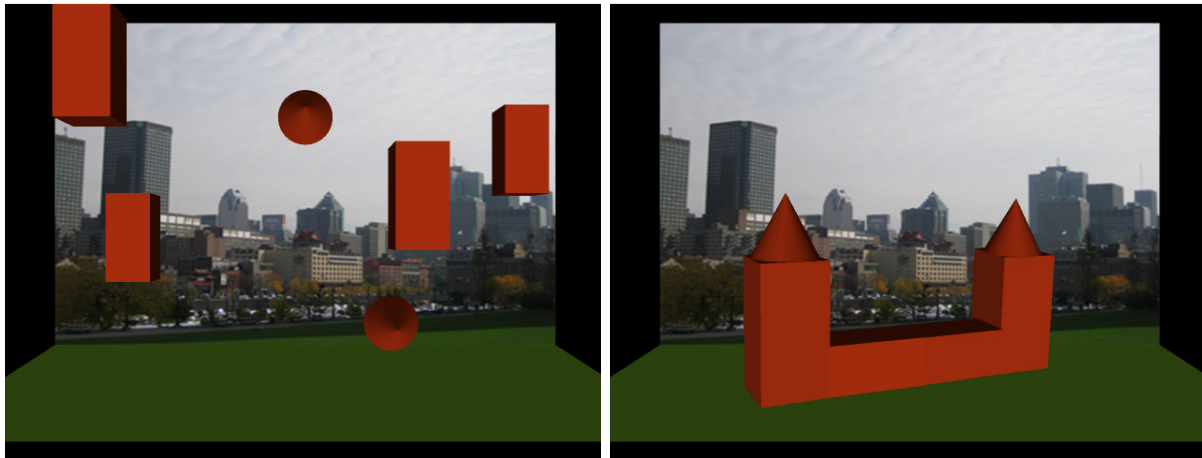


ABBILDUNG 5.04. Ist- (links) und Sollposition (rechts) der virtuellen Bausteine. Aus der Istposition sollten die Probanden die Bauklötze mit dem PHANTOM Omni so verschieben, dass die Sollposition erreicht wurde.

Die virtuellen Bauklötze konnten bewegt werden, indem mit dem Cursor, der den Endeffektor des PHANTOMs darstellte, der Stein berührt wurde und eine Taste am PHANTOM gedrückt gehalten wurde. Die Klötze konnten in alle sechs Freiheitsgraden bewegt werden. Die großen Klötze, die später die Eckpfeiler darstellen sollten, besaßen eine Masse von 1.7 N, die im Sollzustand quer liegenden Klötze eine solche von 0.7 N und die Kegel 0.9 N. In der Taskleiste des Monitors wurde ein Screenshot mit dem Sollzustand abgelegt, dieses konnten die Versuchspersonen jederzeit wiederholt aufrufen. Die Probanden wurden instruiert, die Aufgabe so schnell und so präzise wie möglich auszuführen und die Bausteine so genau wie möglich neben- und aufeinander zu setzen. Die Instruktion lag den Versuchspersonen jeweils in schriftlicher Form vor.

Den Probanden wurde die Entscheidung selbst überlassen, wann sie die Sollposition erreicht hatten. Wenn dies der Fall war, sollte eine Taste auf der Tastatur gedrückt werden und das Fenster mit den virtuellen Bausteinen schloss sich. Auf einen Mausklick hin öffnete sich das Fenster wieder, die Bausteine befanden sich in der Istposition und die Versuchspersonen konnten mit dem nächsten Durchgang beginnen. Um die Effekte der Übung auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung zu untersuchen, wurden mehrere Durchgänge von den Probanden ausgeführt. In der ersten Studie wurde hierfür ein Zeitlimit gesetzt, in der zweiten Studie wurde die Anzahl der Durchgänge auf zwölf festgelegt.

Nach jedem Durchgang sollten die Versuchspersonen sechs Fragen, entnommen aus dem Fragebogen von Scheuchensflug (2001), beantworten, um das Präsenzepfinden zu erfassen. Die sechs Fragen lauteten:

- (1) Wie stark trug das, was Sie gesehen haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten?

- (2) Wie stark trug das, was Sie gespürt haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten?
- (3) Wie stark fühlten Sie sich in die virtuelle Realität hineinversetzt?
- (4) Während der Simulation war die durch sie erschaffene Welt realer oder präsenter als die reale Welt.
- (5) Ich hatte das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein.
- (6) Ich vergaß, dass noch andere Personen im Raum anwesend waren.

Die ersten drei Fragen sollten auf einer Skala von 1 bis 7, wobei 1 „sehr stark“ und 7 „sehr wenig“ kennzeichnete, beantwortet werden. Die Fragen (4) bis (6) sollten ebenfalls auf einer siebenstufigen Ratingskala beurteilt werden, wobei 1 „lehne ab“ und 7 „stimme zu“ beschrieb.

Nach Abschluss aller Durchgänge wurden den Versuchspersonen verschiedene Fragebögen und Tests vorgelegt. Zur Messung der Adaptationsfähigkeit wurde der oben beschriebene selbst entwickelte Fragebogen zur Adaptabilität eingesetzt.

Zur Messung der Leistungsmotivation füllten die Versuchspersonen die Kurzversion des Leistungsmotivationsinventars (LMI-K) von Schuler & Prochaska (2001) aus. Dabei handelt es sich um einen Fragebogen zur Messung der Einstellung gegenüber Arbeit, Beruf und Leistung und besteht aus Fragen wie „Ich habe mir vorgenommen, es beruflich weit zu bringen“ oder „Mir sind Aufgaben lieber, die mir leicht von der Hand gehen, als solche, bei denen ich mich sehr einsetzen muss“. Insgesamt liegen 30 Items vor, die jeweils auf einer siebenstufigen Ratingskala von „trifft gar nicht zu“ bis „trifft vollständig zu“ beantwortet werden sollen.

Für die Erfassung der Konzentrationsfähigkeit wurde mit den Probanden der d2 Aufmerksamkeits-Belastungs-Test von Brickenkamp (2002) durchgeführt. Bei diesem Test sollen unter Zeitbeschränkung Zeichen schnell und sicher unterschieden werden. Die Versuchsperson hat die Aufgabe, auf einem Bogen alle „d“s, die mit zwei Strichen versehen sind, durchzustreichen, wobei auch andere, ähnliche Buchstaben wie „p“ oder „b“ und eine unterschiedliche Anzahl von Strichen an verschiedenen Positionen der Buchstaben vorhanden sind.

Die immersive Tendenz wurde über den Teil des Fragebogens von Scheuchpflug (2001), der dieses Konstrukt misst, erfasst (elf Fragen).

Zusätzlich wurden die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Ausmaß der Erfahrung mit virtuellen Umgebung (auf einer fünfstufigen Skala von keine bis sehr viel) und die durchschnittlich verbrachten Stunden mit Computerspielen mit 3D-Graphik im Monat erhoben.

5.4. Studie 1: Untersuchung der Effekte von Übung, Adaptationsfähigkeit, Leistungsmotivation und Konzentrationsfähigkeit auf Präsenzepfinden und Aufgabenleistung (Kontrollgruppe)⁸

Bei der ersten Studie wurden die Hypothesen H_{Pers1} bis H_{Pers5} und die Hypothese H_{Pers10} untersucht, also die angenommenen Effekte der Übung, der Leistungsmotivation, der Konzentrationsfähigkeit, der Anpassungsfähigkeit sowie der immersiven Tendenz auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Die Versuchspersonen saßen mit dem PHANTOM vor dem Bildschirm, wobei der Sichtabstand zum Monitor mit 50 cm konstant gehalten wurde. Ebenso wurde die Handposition der Probanden kontrolliert. Es wurden explizit nur normalsichtige bzw. auf Normalsicht korrigierte Versuchspersonen zugelassen.

Die Instruktion wurde den Probanden in schriftlicher Form vorgelegt. Danach sollten sie die unter dem Kapitel 5.3. beschriebene Aufgabe mit dem nach jedem Durchgang anschließendem Ausfüllen der sechs Präsenzfragen in möglichst vielen Durchgängen ausführen. Die Bearbeitungsdauer wurde auf 45 min festgelegt, dies wurde den Probanden jedoch nicht mitgeteilt. Es konnten maximal 20 Durchgänge absolviert werden.

Nach der Aufgabenbearbeitung wurden den Versuchspersonen der Adaptabilitätsfragebogen, die Kurzform des Leistungsmotivationsinventars, der Fragebogen zur immersiven Tendenz und der Fragebogen zu den demographischen Daten vorgelegt. Zusätzlich wurde mit ihnen der Test d2 durchgeführt.

Methode

a) *Design*

Die abhängigen Variablen waren die Präsenzratings im Anschluss an jeden Durchgang, die Anzahl der absolvierten Durchgänge, die Nettobearbeitungszeit pro Durchgang in s, d.h. die Zeit, in der ein Baustein in der virtuellen Umgebung bewegt wurde, die durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit pro Durchgang in mm/s, die Häufigkeit des Anfassens und Greifens der Bausteine pro Durchgang (inklusive Redundanzen) sowie die Ergebnisse des Adaptabilitätsfragebogens, des Leistungsmotivationsinventars, des Fragebogens zur immersiven Tendenz und des Test d2.

Als unabhängige Variable diente die Ausführung der Aufgabe.

b) *Stichprobe*

An dem Experiment nahmen 37 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 62 Jahren (Mittelwert 29.00 Jahre, Standardabweichung 9.84 Jahre) teil. Unter ihnen waren 14 Frauen und 23 Männer. Vier Versuchspersonen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da diese weniger als sechs Durchgänge absolviert hatten. Die zu untersuchenden Hypothesen H_{Pers1} bis

⁸ Besonderer Dank geht an Sara Bongartz, die mich im Rahmen ihres Praktikums bei beiden Studien tatkräftig bei der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen und der Durchführung unterstützte.

H_{Pers5} erfordern eine höhere Anzahl an Durchgängen, das Minimum wurde daher auf sechs gesetzt.

Die verbleibende Stichprobe bestand aus elf Frauen und 22 Männern im Alter zwischen 20 und 62 Jahren (Mittelwert 27.12 Jahre, Standardabweichung 8.26 Jahre). Alle waren Rechtshänder. 30 hatten keine bis mittlere Erfahrung mit virtuellen Umgebungen, drei gaben an, viel bis sehr viel Erfahrung zu haben. Die im Monat durchschnittlich verbrachte Zeit mit Computerspielen mit 3D-Graphik belief sich auf 4.26 Stunden (Standardabweichung 6.08 Stunden, individueller Range von 0 bis 25 Stunden pro Monat). Der Mittelwert der sechs z.T. umkodierte Fragen nach jedem Durchgang betrug insgesamt 3.98 mit einer Standardabweichung von 1.16 (individuelle Mittelwerte zwischen 1.00 und 5.96). Im Durchschnitt wurden 12.85 Durchgänge absolviert, Standardabweichung 3.43 Durchgänge, individueller Range zwischen 6 und 20 Durchgängen.

Die durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Durchgang belief sich auf 3.01 min mit einer Standardabweichung von 1.50 min (individuelle mittlere Zeiten zwischen 1.10 und 7.36 min). Die gesamte Nettobearbeitungszeit lag im Mittel bei 34.36 min (Standardabweichung 8.16 min, individueller Range 19.17 bis 45.00 min). Die durchschnittlich dabei verfahrenere Gesamtgeschwindigkeit betrug 23.75 mm/s mit einer Standardabweichung von 8.03 mm/s, individuelle Werte zwischen 9.66 und 44.66 mm/s. Im Mittel wurden die virtuellen Bausteine über alle Durchgänge 10.07 Mal bewegt (Standardabweichung 2.94 Klötze, durchschnittliche Einzelhäufigkeiten von 6.20 bis 16.17 Bausteinen).

Der Mittelwert des Fragebogens zur Adaptabilität war 0.46 mit einer Standardabweichung von 0.34, die individuellen Werte schwankten zwischen -0.10 und 1.40. Diese Werte entsprechen weitgehend denen der Eichstichprobe. Der Mittelwert der Standardwerte des Leistungsmotivationsinventars betrug 103.94, die Standardabweichung 9.13 (individuelle Standardwerte zwischen 83 und 120). Der Fragebogen zur immersiven Tendenz lieferte einen Durchschnitt von 4.17 mit einer Standardabweichung von 0.87 (individuelle Mittelwerte zwischen 1.42 und 5.33). Der Mittelwert der Standardwerte des Test d2 schließlich belief sich auf 101.55 bei einer Standardabweichung von 8.80 (individuelle Standardwerte von 83 bis 123).

Ergebnisse

Für jede Versuchsperson wurde die Anzahl der absolvierten Durchgänge ermittelt. Für das Präsenzepfinden wurden die sechs Ratings, die nach jedem Durchgang erhoben wurden, pro Durchgang gemittelt. Als Aufgabenleistungsmaße wurden die Zeit bis zur Beendigung jedes Durchgangs in min, die mittlere Geschwindigkeit in mm/s und die Anzahl der pro Durchgang bewegten Bausteine aufgezeichnet. Die Standardwerte des Leistungsmotivationsinventars und des Test d2 wurden aus den Normtabellen der Tests ermittelt. Beim Adaptabilitätsfragebogen und beim Fragebogen zur immersiven Tendenz wurden jeweils die Mittelwerte gebildet. Bei allen Verfahren entsprechen hohe Werte einer hohen Ausprägung des Merkmals.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Die deskriptiven Werte für die abhängigen Variablen sind für die einzelnen Versuchspersonen in Tabelle 5.01 aufgelistet.

TABELLE 5.01. Deskriptive Werte für jede abhängige Variable pro Versuchsperson.

Vp-Nr.	Anzahl der Durchgänge	Präsenzrating (Mittelwert)	Mittlere Zeit bis zur Beendigung des Durchgangs	Mittlere Geschwindigkeit pro Durchgang	Mittlere Anzahl der bewegten Bausteine pro Durchgang	Standardwert im Leistungsmotivationsinventar	Standardwert im Test d2	Mittelwert im Adaptabilitätsfragebogen	Mittelwert im Fragebogen zur immersiven Tendenz
1	8	3.73	4.69	28.12	10.88	92	101	0.25	3.67
2	7	3.33	5.08	11.92	12.00	118	108	-0.10	3.58
3	14	4.88	1.89	22.26	10.00	115	102	0.75	4.17
4	8	5.96	5.91	19.33	14.25	99	90	0.10	4.25
5	13	3.74	2.13	40.80	16.00	103	108	0.45	5.25
6	14	3.02	2.05	44.66	6.86	89	110	0.20	4.33
7	9	4.98	2.13	32.89	8.56	105	84	0.95	4.50
8	15	5.76	1.76	27.03	7.60	108	112	0.15	5.25
9	14	4.69	2.56	22.34	8.36	96	99	0.30	4.08
10	13	5.90	3.50	14.34	8.15	99	96	0.70	4.50
11	7	4.31	4.47	19.37	8.29	102	94	0.15	5.17
12	14	4.19	2.67	23.62	9.86	106	93	0.20	4.75
13	13	3.33	2.42	25.58	9.54	105	116	0.15	4.92
14	8	3.17	5.98	9.66	11.88	102	96	0.40	3.50
15	13	4.67	2.48	31.73	14.85	101	100	0.11	4.08
16	15	4.86	1.67	19.54	6.47	111	106	0.75	4.83
17	12	5.35	3.09	20.52	13.50	110	97	0.85	3.75
18	13	4.38	3.10	18.47	10.85	104	107	0.40	5.17
19	14	2.51	2.14	25.14	8.79	94	83	0.75	4.33
20	15	4.86	1.73	19.92	6.20	94	94	0.45	5.17
21	14	3.87	2.76	13.96	7.71	109	98	0.30	3.92
22	13	3.29	3.24	23.35	12.69	120	97	0.90	2.33
23	10	4.52	5.02	18.84	14.60	96	106	0.55	3.42
24	17	1.00	1.15	41.86	6.65	83	104	1.40	1.42
25	6	4.72	7.36	20.16	16.17	111	95	0.70	4.50
26	17	3.00	2.14	22.84	8.29	115	102	0.60	3.67
27	15	4.99	2.25	26.94	8.07	112	102	0.00	4.92
28	14	2.57	3.22	20.79	13.14	108	102	0.60	4.33
29	20	3.67	1.10	27.49	6.95	106	118	0.80	3.58
30	12	2.33	3.22	14.57	8.00	88	107	0.00	5.33
31	13	2.00	2.47	29.25	9.23	112	104	0.85	3.08
32	14	3.65	2.22	24.20	10.93	117	123	0.40	3.58
33	20	4.09	1.56	22.38	6.95	100	97	0.20	4.33

Bei den demographischen Daten ergaben sich signifikante Korrelationen zwischen dem Geschlecht und der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen, $\tau_{\text{Kendall}} = .382$, $p = .020$, $n = 33$. Hier hatten generell die männlichen Versuchspersonen mehr Erfahrung als die weiblichen. Analog verbrachten Männer mehr Stunden mit Computerspielen mit 3D-Graphik im Monat als Frauen, $\tau_{\text{Kendall}} = .432$, $p = .012$, $n = 33$. Die Erfahrung mit virtuellen Umgebungen korrelierte signifikant mit den im Monat verbrachten Stunden mit Spielen von Computerspielen mit 3D-Graphik, $r_{\text{Spearman}} = .419$, $p = .015$, $n = 33$.

Die Erfahrung mit virtuellen Umgebungen zeigte einen signifikanten Zusammenhang im mittleren Bereich zu den Mittelwerten des Fragebogens zur immersiven Tendenz, $r_{\text{Spearman}} = .381$, $p = .029$, $n = 33$. Die Versuchspersonen, die mehr Erfahrung mit virtuellen Umgebungen hatten, zeigten demnach eine höhere Bereitschaft, sich in eine virtuelle Umwelt hineinzusetzen.

Die Mittelwerte des Adaptabilitätsfragebogens korrelierten negativ mit denjenigen des Fragebogens zur immersiven Tendenz, $r = -.554$, $p = .001$, $n = 33$. Dieses Ergebnis bestätigt das von Slater & Usoh (1993c) gefundene Ergebnis des negativen Zusammenhangs zwischen Adaptabilität und immersiver Tendenz (s. Unterkap. 5.1.5.).

Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe zeigte mittelhohe Korrelationen zu der Anzahl der Durchgänge, $r_{\text{Spearman}} = -.520$, $p = .002$, zu der Anzahl der bewegten Bausteine pro Durchgang, $r_{\text{Spearman}} = .549$, $p = .001$, und zur mittleren Geschwindigkeit pro Durchgang, $r = -.611$, $p < .000$, jeweils $n = 33$. Je höher die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe war, d.h. je niedriger die Ausprägung dieses Aufgabenleistungsmaßes war, desto weniger Durchgänge wurden absolviert, desto mehr Bausteine wurden bewegt und desto niedriger fiel die Bearbeitungsgeschwindigkeit auf. Ebenso ergab sich eine negative signifikante Korrelation zwischen der Anzahl der bewegten Bausteine und der Anzahl der Durchgänge, $r_{\text{Spearman}} = -.659$, $p < .000$, d.h. je mehr Bausteine bewegt wurden, desto weniger Durchgänge wurden absolviert. Diese Zusammenhänge erscheinen plausibel.

Die Werte des Fragebogens zur immersiven Tendenz und die Präsenzratings zeigten einen mittleren signifikanten Zusammenhang, $r = .485$, $p = .004$, $n = 33$. Die Hypothese H_{Pers10} wurde hier somit bestätigt.

Ansonsten zeigten sich keine anderen signifikanten Korrelationen.

2. Übungseffekte auf das Präsenzepfinden

Drei der 33 Versuchspersonen (entspricht einem Prozentanteil von 9%) zeigten über alle Durchgänge ein konstantes Präsenzepfinden, d.h. die Bewertung aller sechs Fragen war immer gleich. Diese wurden für die Untersuchung der Effekte der Übung auf das Präsenzepfinden herausgenommen.

Bei allen anderen Versuchspersonen ergab sich eine Variation der Bewertung. Als strukturentdeckendes Verfahren wurde eine hierarchische Clusteranalyse über die Durchgänge für alle Versuchspersonen durchgeführt, da hier das Ziel war, die Versuchspersonen zu Gruppen so zusammenzufassen, dass der Verlauf der Bewertung des Präsenzepfindens in einer Gruppe möglichst ähnlich und die Gruppen untereinander möglichst unähnlich sind. Für die Bestimmung der Ähnlichkeiten wurde der Q-Korrelationskoeffizient herangezogen, da dieser Ähnlichkeiten zwischen den Versuchspersonen unter Berücksichtigung aller Durchgänge berechnet. Da zu Anfang keine Gruppierung vorgegeben war, wurde ein hierarchisches agglomeratives Verfahren gewählt, wobei die größten Abstände zwischen den Versuchspersonen berücksichtigt wurden (Complete-Linkage-Verfahren, „entferntester Nachbar“). Da acht Probanden 14 Durchgänge absolvierten, insgesamt acht Versuchspersonen jedoch 15 und mehr Durchgänge hatten, wurde die hierarchische Clusteranalyse nur über die ersten 14 Durchgänge durchgeführt.

Bei einem Heterogenitätsmaß von 17 ergaben sich drei Cluster. Bei der Inspektion der Verläufe des Präsenzepfindens über die Durchgänge für die einzelnen Versuchspersonen ergaben sich für diese Cluster drei prinzipielle Abfolgen:

- (1) Das Präsenzepfinden nahm kontinuierlich ab. In dieses Cluster fielen 13 der 33 Versuchspersonen (entspricht einem Anteil von 39%).

- (2) Das Präsenzepfinden oszilliert über die Durchgänge. Dieses Cluster fusionierte bei einem Heterogenitätsmaß von 24 mit dem ersten Cluster, was darauf hindeutet, dass die Gesamttendenz des Präsenzepfindens eher absteigend war. Hier waren fünf der 33 Versuchspersonen vorzufinden (entspricht einem Anteil von 15%).
- (3) Das Präsenzepfinden stieg kontinuierlich an. In dieses Cluster wurden 12 der 33 Versuchspersonen eingeordnet (entspricht einem Anteil von 36%).

Die Clusterzugehörigkeiten zeigten keine Korrelationen mit den Aufgabenleistungsmaßen oder mit dem Präsenzepfinden, d.h. die abhängigen Variablen wurden nicht durch die Clusterzugehörigkeit eines Probanden beeinflusst.

Die Werte für das Präsenzepfinden wurden pro Versuchsperson und pro Durchgang standardisiert und pro Cluster gemittelt. Die so gewonnenen Verläufe für die drei Cluster stellt Abbildung 5.05 dar.

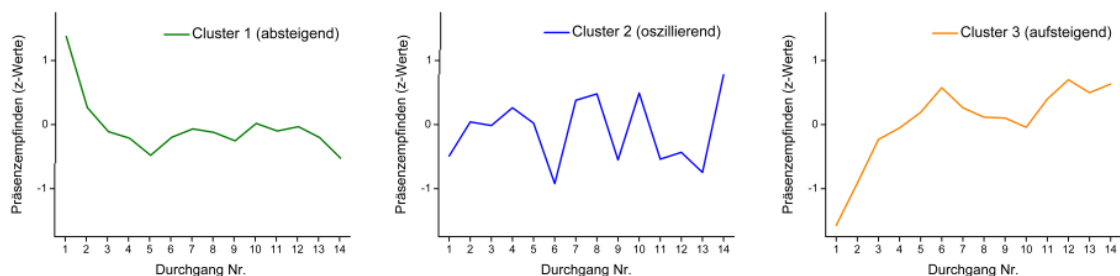


ABBILDUNG 5.05. Die drei aufgefundenen Cluster als Mittelwerte der standardisierten Werte für das Präsenzepfinden für die im jeweiligen Cluster eingeordneten Versuchspersonen.

Insgesamt zeigen sich somit vier Muster für den Einfluss der Übung auf das Präsenzepfinden:

- Kein Einfluss der Übung auf das Präsenzepfinden. Angesichts der Tatsache, dass tatsächlich keine Variation in der Versuchsbedingung eingeführt wurde, erscheint dieses Muster als das naheliegendste. Dennoch wurde dieser Verlauf nur bei 9% der Versuchspersonen aufgefunden.
- Oszillierender Verlauf des Präsenzepfindens über die Durchgänge (Cluster 2). Diesem Muster folgten 15% der Probanden.
- Absteigender Verlauf des Präsenzepfindens über die Durchgänge (Cluster 1). Dieser Verlauf erfolgte für 39% der Versuchspersonen.
- Aufsteigende Tendenz für das Präsenzepfinden über die Durchgänge (Cluster 3). Hier konnten 36% der Probanden zugeordnet werden.

Da der Großteil der Probanden (76%) somit entweder in Cluster 1 (absteigendes Präsenzepfinden über die Durchgänge) oder in Cluster 3 (aufsteigendes Präsenzepfinden über die Durchgänge) eingeordnet werden konnten, gilt die Hypothese H_{Pers1} als bestätigt. Tatsächlich ergaben sich hier – wie postuliert – interindividuelle Reaktionen auf die Variable Übung, die wahrscheinlich durch die

Aufmerksamkeitsprozesse, die bereits im Unterkapitel 5.1.2. beschrieben wurden, moderiert wurden.

3. Effekte der Übung auf die Aufgabenleistung

Um die Übungseffekte auf die Aufgabenleistung zu untersuchen, wurden die Aufgabenleistungsmaße Zeit bis zur Beendigung eines Durchgangs, Geschwindigkeit pro Durchgang und Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine pro Durchgang über die Versuchspersonen gemittelt. Wiederum wurde das Maximum der Durchgänge wegen der Zahl der Fälle auf 14 gesetzt. Mit Hilfe einer Zeitreihenanalyse über die Durchgänge mittels Regressionsanalyse wurde ermittelt, welchem Verlauf die drei Aufgabenleistungsmaße folgen.

Für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe pro Durchgang ergab sich die höchste Güte für die Anpassung an eine Potenzfunktion der Form

$$\text{Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe} = 5.818 \cdot \text{Durchgang}^{-0.483} \text{ min,}$$

$F(1,12) = 324.94$, $p < .000$, $R^2 = .964$. Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe folgt demnach dem Potenzgesetz der Übung.

Für die Geschwindigkeit pro Durchgang konnte keine Anpassung gefunden werden, da hier zu hohe Schwankungen vorlagen. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Kapitel 4.1.7. und 4.3., wonach die Geschwindigkeit subjektiv unterschiedlich ist und individuell eher konstant bleibt. In den folgenden Analysen wird daher die Geschwindigkeit als Aufgabenleistungsmaß nicht mehr berücksichtigt.

Für die Anzahl der bewegten Bausteine pro Durchgang ergab sich wiederum die höchste Anpassungsgüte für eine Potenzfunktion der Form

$$\text{Anzahl bewegter Bausteine} = 14.962 \cdot \text{Durchgang}^{-0.261} \text{ Bausteine,}$$

$F(1,12) = 214.70$, $p < .000$, $R^2 = .947$. Auch die Anzahl der bewegten Bausteine folgt dem Potenzgesetz der Übung. Tabelle 5.02 liefert die empirisch gefundenen und durch die jeweilige Funktion vorhergesagten Werte der Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und der Anzahl bewegter virtueller Bausteine pro Durchgang über die ersten 14 Durchgänge.

TABELLE 5.02. Empirisch ermittelte und durch die gefundenen Potenzfunktionen vorhergesagte Werte für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und die Anzahl bewegter virtueller Bausteine über die ersten 14 Durchgänge.

Durchgang Nr.	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe [min]		Anzahl bewegter virtueller Bausteine	
	empirische Werte	vorhergesagte Werte	empirische Werte	vorhergesagte Werte
1	5.36	5.82	15.67	14.96
2	4.03	4.16	12.30	12.49
3	3.39	3.42	10.27	11.23
4	3.27	2.98	10.48	10.42
5	2.73	2.67	9.00	9.83
6	2.77	2.45	9.88	9.38
7	2.49	2.27	6.69	9.01
8	2.09	2.13	8.33	8.70

Durchgang Nr.	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe [min]		Anzahl bewegter virtueller Bausteine	
	empirische Werte	vorhergesagte Werte	empirische Werte	vorhergesagte Werte
9	1.99	2.01	8.85	8.44
10	1.95	1.91	8.58	8.21
11	1.76	1.83	7.72	8.01
12	1.73	1.75	7.64	7.83
13	1.69	1.68	7.70	7.66
14	1.39	1.64	7.44	7.52

Die Hypothese $H_{\text{Pers}2}$ gilt demnach als bestätigt. Abbildung 5.06 stellt die empirischen und vorhergesagten Werte für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und für die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine graphisch dar.

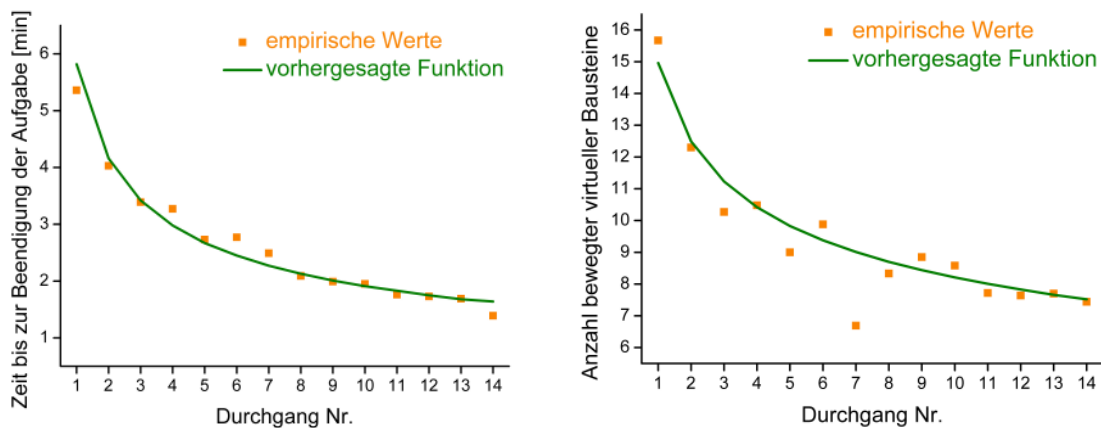


ABBILDUNG 5.06. Empirische und laut der Zeitreihenanalyse vorhergesagte Werte für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (links) und die Anzahl bewegter Bausteine (rechts) über die ersten 14 Durchgänge.

4. Effekte der Leistungsmotivation und des Konzentrationsvermögens auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung

Aus der Abbildung 5.06 wird ersichtlich, dass ab dem fünften Durchgang keine wesentliche Verbesserung sowohl für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe als auch für die Anzahl bewegter Bausteine pro Durchgang mehr stattfindet. Daher wird angenommen, dass die Versuchspersonen ab dem sechsten Durchgang in der Aufgabe geübt sind.

Daher wurde der Mittelwert des Präsenzepfindens, der Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und der Anzahl der bewegten Bausteine über die ersten fünf und über die restlichen Durchgänge gemittelt und die Differenz aus diesen beiden Werten gebildet. Die Versuchsperson mit sechs Durchgängen wurde aus dieser Analyse ausgeschlossen. Für alle abhängigen Variablen zeigten sich sowohl konstante, schlechtere als auch bessere Werte. Diese Berechnung wurde vorgenommen, um die Änderung in den abhängigen Variablen bei geübter Aufgabe zu erfassen.

Es wurde angenommen, dass eine niedrige Ausprägung der Leistungsmotivation zu einem abfallenden Präsenzepfinden und einer schlechteren Aufgabenleistung führt,

wohingegen eine hohe Ausprägung zu einem gleichbleibenden resp. steigenden Präsenzepfinden führt. Für die Aufgabenleistung bei hoher Leistungsmotivation sollte die Konzentrationsfähigkeit eine Rolle spielen, bei geringer Konzentrationsfähigkeit sollte die Aufgabenleistung schlechter werden, bei hohem Konzentrationsvermögen sollte diese gleich bleiben.

Um die Effekte der Leistungsmotivation und des Konzentrationsvermögens auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung zu untersuchen, wurde jeweils eine lineare Regressionsanalyse mit der abhängigen Variablen Differenz des Präsenzepfindens, Differenz der Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe bzw. Differenz der Anzahl der bewegten Bausteine jeweils zwischen den ersten fünf und den restlichen Durchgängen und den unabhängigen Variablen Standardwert des Leistungsmotivationsinventars durchgeführt.

Für alle abhängigen Variablen ergab sich für die unabhängige Variable Standardwert der Leistungsmotivation eine sehr schlechte Anpassungsgüte für das Modell,

$$F_{\text{Präsenzepfinden}}(1,30) = 3.19, p = .084, R^2 = .096;$$

$$F_{\text{Zeit_bis_zur_Beendigung_der_Aufgabe}}(1,30) = 0.54, p = .468, R^2 = .018;$$

$$F_{\text{Anzahl_bewegter_Bausteine}}(1,30) = 0.15, p = .703, R^2 = .005.$$

Da das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung nicht durch die Ausprägung in der Leistungsmotivation vorhergesagt werden kann, werden die Funktionen hier nicht berichtet. Die Leistungsmotivation hatte demnach nicht den vorhergesagten Effekt auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung, vielmehr konnte keine Auswirkung der Leistungsmotivation auf die Veränderung der abhängigen Variablen bei geübter Aufgabe festgestellt werden.

Für den Einfluss der Konzentrationsfähigkeit wurde ein Mediansplit für die Leistungsmotivation vorgenommen ($Md = 105.00$), um die Versuchspersonen in eine niedrig und eine hoch leistungsmotivierte Gruppe einzuteilen. Für die Gruppe der hoch leistungsmotivierten Versuchspersonen ($n = 14$) wurde erneute eine lineare Regressionsanalyse jeweils mit der abhängigen Variablen Präsenzepfinden, Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und Anzahl der bewegten Bausteine und der unabhängigen Variablen Standardwert des Test d2 berechnet.

Wiederum ergab sich auch für die unabhängige Variable Konzentrationsfähigkeit eine schlechte Modellanpassungsgüte,

$$F_{\text{Präsenzepfinden}}(1,12) = 0.13, p = .726, R^2 = .011;$$

$$F_{\text{Zeit_bis_zur_Beendigung_der_Aufgabe}}(1,30) = 1.80, p = .205, R^2 = .130;$$

$$F_{\text{Anzahl_bewegter_Bausteine}}(1,30) = 0.93, p = .354, R^2 = .072.$$

Auch hier werden die Funktionen nicht berichtet. Entgegen der Annahme hatte die Konzentrationsfähigkeit bei hoher Leistungsmotivation ebenfalls keinen Einfluss auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung. Die Hypothesen H_{Pers3} und H_{Pers4} werden somit verworfen.

Die Ergebnisse zu den Effekten der Leistungsmotivation und der Konzentrationsfähigkeit auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden wurden nicht vorhergesagt und sind überraschend. Da bei den Ergebnissen kein Trend in die vorhergesagte Richtung erkennbar war, ist anzunehmen, dass sowohl die

Leistungsmotivation als auch die Konzentrationsfähigkeit keine Auswirkungen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung haben. Deskriptiv konnten ebenfalls keinerlei Zusammenhänge zwischen den demographischen Daten oder den Testwerten und der Leistungsmotivation resp. dem Konzentrationsvermögen gefunden werden. Möglicher Weise interpretierten die Probanden die hier gestellte Aufgabe nicht als genügend leistungsorientiert, so dass diese Persönlichkeitseigenschaft nicht evoziert wurde. Ebenso ist denkbar, dass für eine Auswirkung der Konzentrationsfähigkeit eine ermüdendere Aufgabe vonnöten ist.

5. Effekte der Adaptabilität auf das Präsenzepfinden

Es wurde angenommen, dass sich der Verlauf des Präsenzepfindens über die Übungsdurchgänge für hochadaptible Personen von niedrig anpassungsfähigen Personen unterscheidet. Hoch anpassungsfähige Probanden sollten anfangs einen stärkeren Anstieg im Präsenzerleben zeigen als niedrig anpassungsfähige Versuchspersonen. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde für jede Versuchsperson über die ersten fünf Durchgänge, die unter dem Unterpunkt 2. der Ergebnisse als Übungsdurchgänge identifiziert wurden, die mittlere Steigung für das Präsenzepfinden berechnet. Die Überprüfung der Hypothese zum Zusammenhang zwischen Anpassungsfähigkeit und Präsenzepfinden wurde für die zwei Cluster von Versuchspersonen vorgenommen, die einen eindeutig ansteigenden bzw. absteigenden Verlauf des Präsenzepfindens über die Übungsdurchgänge zeigten (Cluster 1 und Cluster 3). Dabei wurde jeweils der Betrag der Steigung herangezogen, da die Hypothese H_{pers5} lediglich eine strukturelle Aussage über die Stärke der Steigung, nicht jedoch über deren Richtung beinhaltet. Als Maß für die Anpassungsfähigkeit wurde der Mittelwert der Ratings aus dem Adaptabilitätsfragebogen verwendet.

Es zeigte sich eine signifikante negative Korrelation im mittleren Bereich zwischen Adaptabilität und den Betrag der Steigung des Präsenzepfindens über die ersten fünf Durchgänge, $r = -.434$, $p = .030$, $n = 25$.

Diese Korrelation bedeutet, dass die Probanden mit einer eher geringen Anpassungsfähigkeit eine steilere Steigung aufweisen als die Versuchspersonen mit einer eher hohen Adaptabilität. Dieser Zusammenhang widerspricht der Vorhersage, wonach Personen mit geringer Anpassungsfähigkeit ein langsames Ansteigen des Präsenzepfindens aufweisen sollten. Die Hypothese H_{pers5} ist damit verworfen.

Weiterhin zeigte sich eine negative Korrelation zwischen der Anpassungsfähigkeit und dem Präsenzepfinden über alle Versuchspersonen, die jedoch keine Signifikanz erreichte, $r = -.245$, $p = .170$, $n = 33$. Gemeinsam mit dem Verwerfen der Hypothese H_{pers5} wird vermutet, dass die negative Korrelation zwischen der Anpassungsfähigkeit und dem Präsenzepfinden keine strukturelle, sondern eher eine inhaltliche Beziehung zueinander aufweisen. Die negative Korrelation scheint also nicht durch das unterschiedliche Steigungsverhalten des Präsenzepfindens über die Durchgänge zustande zu kommen, sondern eher einem systematischen Zusammenhang zu folgen, wonach Personen mit geringer Adaptationsfähigkeit einen steileren Anstieg im Präsenzepfinden aufweisen, dies jedoch nicht bzw. weniger stark abfällt und die Personen dadurch insgesamt ein

höheres Präsenzepfinden erleben als Personen mit hoher Adaptabilität. Wodurch dieser Effekt zustande kommt, kann hier nicht abschließend geklärt werden.

Die Anpassungsfähigkeit zeigte keine Korrelation mit den Aufgabenleistungsmaßen Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe ($r = -.126, p = .490, n = 32$) und Anzahl bewegter virtueller Bausteine ($r = -.023, p = .900, n = 32$). Die fehlende Beziehung zwischen Adaptabilität und Aufgabenleistung entspricht den Annahmen.

5.5. Studie 2: Untersuchung der Effekte von Aufmerksamkeitsprozessen und Involviertheit auf das Präsenzepfinden und Aufgabenleistung (Experimentalgruppe)

In der zweiten Studie wurden explizit die Hypothesen H_{Pers6} bis H_{Pers9} untersucht. Diese Hypothesen betreffen die Effekte der Involviertheit auf das Präsenzepfinden sowie die Effekte der Aufmerksamkeitszuweisung auf die aktuelle Umgebung und auf aufgabenirrelevante und –relevante Aspekte innerhalb der virtuellen Umgebung.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Auch bei der zweiten Studie saßen die Versuchspersonen mit dem PHANTOM vor dem Bildschirm, wobei der Sichtabstand zum Monitor mit 50 cm konstant gehalten wurde. Ebenso wurde die Handposition der Probanden kontrolliert. Es wurden explizit nur normalsichtige bzw. auf Normalsicht korrigierte Versuchspersonen zugelassen. Die Probanden absolvierten dieselbe Standardaufgabe wie in Studie 1, die im Unterkapitel 5.3. beschrieben ist.

Die Instruktion wurde den Probanden in schriftlicher Form vorgelegt. Die Involviertheit wurde über zwei verschiedene Instruktionen variiert. In der ersten Instruktion, die eine hohe Involviertheit induzieren sollte, wurde den Versuchspersonen mitgeteilt, dass es sich um eine wichtige letzte Studie in der Endphase eines Forschungsprojektes handelt, in der jedes Einzelergebnis wichtig ist. Zusätzlich wurde mitgeteilt, dass die Versuchspersonen für jeden absolvierten Durchgang einen Geldbonus erhalten und sich für die Präzision der Aufgabenbearbeitung eine gesonderte Prämie erarbeiten konnten. Die Instruktion wurde farbig ausgedruckt und in Klarsichtfolie vorgelegt.

In der zweiten Instruktion, die eine niedrige Involviertheit auslösen sollte, wurde den Probanden mitgeteilt, dass sehr viele Versuchspersonen untersucht würden und es daher nicht auf die Einzelergebnisse ankommt. Es wurde kein zusätzlicher Geldbonus bzw. keine gesonderte Prämie versprochen. Die Instruktion wurde als Schwarz-Weiß-Kopie vorgelegt. Zusätzlich wurde die Instruktion mehrfach geknickt und mit Eselsohren versehen. Beide Instruktionen sind im Anhang D zu finden.

Von jeder Versuchsperson wurden zwölf Durchgänge absolviert. Da die Versuchspersonen in Studie 1 nach fünf Durchgängen in der Aufgabe geübt waren, wurde die Anzahl der Übungsdurchgänge zur Sicherheit hier auf sechs festgelegt. Nach diesen sechs Übungsdurchgängen, in denen keine Variationen auftraten, wurden die Experimentaldurchgänge durchlaufen. Dabei wurden drei Variationen des Abziehens des Aufmerksamkeitsfokus von der Aufgabe realisiert.

Die erste Variation bestand in einer Störung aus der aktuellen Umgebung. Hier öffnete sich während der Bearbeitung der Aufgabe zu einem zufälligen Zeitpunkt ein Fenster auf dem

Bildschirm und die Versuchspersonen wurden instruiert, eine Aufgabe auf einem Zettel, der umgedreht neben die Tastatur hingelegt wurde, zu bearbeiten. Die Aufgabe bestand darin, den Bearbeitungsstatus eines zuvor angefertigten Screenshots der noch nicht fertiggestellten Stadtmauer auf einer Skala zwischen 0 und 100% zu beurteilen. Hierfür wurden zwei verschiedene Screenshots produziert, die im Anhang E zu finden sind. Bei dieser Störung sollten sowohl das Präsenzepfinden als auch die Aufgabenleistung abnehmen, da der Aufmerksamkeitsfokus aus der virtuellen Umgebung heraus in die aktuelle Umgebung geleitet wurde (**H_{Pers7}**).

Die zweite Variation bestand in einer aufgabenrelevanten Störung aus der virtuellen Umgebung. Um die Bedingungen vergleichen zu können, öffnete sich zu einem zufälligen Zeitpunkt nur auf dem linken Viertel der Bildschirmseite ein Menüfenster, bei dem die Versuchspersonen aufgefordert wurden, den derzeitigen Bearbeitungsstatus ihrer eigenen Stadtmauer auf einer Skala zwischen 0 und 100% abzuschätzen. Bei dieser Variation sollte sich die Störung nur auf die Aufgabenleistung auswirken, nicht jedoch auf das Präsenzepfinden, da der Aufmerksamkeitsfokus weiterhin in der virtuellen Umgebung gehalten, allerdings von der Aufgabe abgezogen wurde (**H_{Pers8}**).

Beide Variationen wurden in den Instruktionen angekündigt und die Probanden konnten per Mausklick auf den Bildschirm wieder zu ihrer ursprünglichen Aufgabe zurückkehren.

Die dritte Variation bestand in einer aufgabenirrelevanten Störung aus der virtuellen Umgebung. Diese Variation wurde nicht in den Instruktionen erwähnt. Sie bestand darin, dass beim Anklicken eines bestimmten virtuellen Bausteins das Hintergrundbild verschwand und stattdessen ein weißer Hintergrund angezeigt wurde. Beim Loslassen des Bausteins wurde wieder das ursprüngliche Hintergrundbild eingeblendet. Der kritische Baustein wurde vor dem betreffenden Durchgang per Zufall festgelegt. Diese Irritation sollte sich vor allem auf Personen mit hoher Anpassungsfähigkeit auswirken, da hier vorhergesagt wurde, dass diese durch die im Vergleich zu niedrig adaptiblen Personen zusätzlich zur Verfügung stehenden Aufmerksamkeitsressourcen sensibler auf aufgabenirrelevante Störungen reagieren sollten (**H_{Pers9}**).

Nach dem Experiment wurden die Versuchspersonen über den wahren Zweck der Variationen aufgeklärt und alle erhielten dieselbe Vergütung für die Teilnahme an diesem Versuch.

Bei den sechs Experimentaldurchgängen wurde jede Variation und ein Durchgang ohne Variation mindestens ein Mal pro Versuchsperson vorgegeben. Der Durchgang ohne Variation wurde eingeführt, um die Prädizierbarkeit von Experimentalbedingungen durch die Probanden zu vermeiden. Von diesen vier Bedingungen (keine, aufgabenrelevante Störung in der aktuellen Umgebung, aufgabenrelevante Störung in der virtuellen Umgebung, aufgabenirrelevante Störung in der virtuellen Umgebung) wurden jeder Versuchsperson zusätzlich zwei dieser vier Bedingungen vorgegeben. Die Vorgabe der doppelten Bedingungen sowie die Reihenfolgen wurden sequentiell balanciert. Für die beiden Instruktionsgruppen wurde die Vorgabe parallelisiert, d.h. die Vorgabe für eine Person in der Bedingung, die eine hohe Involviertheit hervorrufen sollte, hatte immer eine Entsprechung in der Bedingung, in der eine niedrige Involviertheit induziert wurde.

Zur Kontrolle der gefundenen Effekte in der ersten Studie wurden den Versuchspersonen nach der Aufgabenbearbeitung wiederum der Adaptabilitätsfragebogen, die Kurzform des Leistungsmotivationsinventars, der Fragebogen zur immersiven Tendenz und der Fragebogen zu den demographischen Daten vorgelegt. Auch hier wurde zusätzlich der Test d2 zur Messung der Konzentrationsfähigkeit durchgeführt.

Methode

a) Design

Analog zu Studie 1 waren die abhängigen Variablen die Präsenzratings am Anschluss an jeden Durchgang, die Anzahl der absolvierten Durchgänge, die Nettobearbeitungszeit pro Durchgang in s, die Häufigkeit des Anfassens und Greifens der Bausteine pro Durchgang sowie die Ergebnisse des Adaptabilitätsfragebogens, des Leistungsmotivationsinventars, des Fragebogens zur immersiven Tendenz und des Test d2.

Als unabhängige Variablen dienten die Ausführung der Aufgabe sowie die drei Variationen, die den Aufmerksamkeitsfokus verschoben.

b) Stichprobe

Insgesamt nahmen an dem Experiment 33 Versuchspersonen teil. Davon mussten zehn Personen ausgeschlossen werden, da diese weniger als zwölf Durchgänge in zwei Stunden absolvierten. Es verblieben 23 Versuchspersonen in der Stichprobe, wobei elf von ihnen die niedrige Involviertheitsbedingung und zwölf die hohe Involviertheitsbedingung hatten. Von den Probanden waren sieben Frauen und 16 Männer im Alter zwischen 19 und 54 Jahren (Mittelwert 30.35 Jahre, Standardabweichung 10.96 Jahre). Alle waren Rechtshänder. 21 hatten keine bis mittlere Erfahrung mit virtuellen Umgebungen, zwei gaben an, viel Erfahrung zu haben. Mit Computerspielen mit 3D-Graphik verbrachten die Probanden im Durchschnitt 1.88 Stunden im Monat (Standardabweichung 3.45 Stunden, Range zwischen 0 und 10 Stunden pro Monat). Der Mittelwert der sechs Präsenzratings nach jedem Durchgang belief sich auf 4.37 mit einer Standardabweichung von 0.97 (individuelle Mittelwerte zwischen 1.88 und 5.82).

Die durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Durchgang betrug 3.69 min mit einer Standardabweichung von 1.00 min (individuelle mittlere Zeiten zwischen 1.87 und 5.57 min), wobei die Zeiten, die die Nebenaufgaben in Anspruch nahmen, bereits abgezogen worden waren. Die gesamte Nettobearbeitungszeit belief sich im Mittel auf 42.66 min (Standardabweichung 12.25 min, individueller Range 21.79 bis 66.20 min). Die durchschnittliche Geschwindigkeit war 24.22 mm/s mit einer Standardabweichung von 6.64 mm/s (individuelle Werte zwischen 15.77 und 38.61 mm/s). Über alle Durchgänge wurden die virtuellen Bausteine im Mittel 11.73 Mal bewegt (Standardabweichung 3.82 Steine, durchschnittliche Einzelhäufigkeiten zwischen 6.42 und 18.58 Bauklötzen).

Der Mittelwert des Fragebogens zur Adaptabilität betrug 0.24 mit einer Standardabweichung von 0.34, die individuellen Werte schwankten zwischen -0.75 und 0.95. Der Mittelwert der Standardwerte des Leistungsmotivationsinventars war 100.26, die Standardabweichung 6.72 (individuelle Standardwerte zwischen 92 und 116). Der Fragebogen zur immersiven Tendenz belief sich im Durchschnitt auf 3.99 mit einer

Standardabweichung von 0.69 (individuelle Mittelwerte zwischen 2.17 und 5.33). Der Mittelwert der Standardwerte des Test d2 schließlich war 103.65 bei einer Standardabweichung von 9.68 (individuelle Standardwerte von 88 bis 128).

Ergebnisse

Für das Präsenzempfinden wurden pro Versuchsperson die sechs Ratings, die nach jedem Durchgang erhoben wurden, pro Durchgang gemittelt. Als Aufgabenleistungsmaße wurden die Zeit bis zur Beendigung jedes Durchgangs in s, die mittlere Geschwindigkeit in mm/s und die Anzahl der pro Durchgang bewegten Bausteine aufgezeichnet. Bei der Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe wurden jeweils die Bearbeitungszeiten, die die Nebenaufgabe in der aktuellen bzw. virtuellen Umgebung in Anspruch nahmen, abgezogen. Die Standardwerte des Leistungsmotivationsinventars und des Test d2 wurden aus den Normtabellen der Tests ermittelt. Beim Adaptabilitätsfragebogen und beim Fragebogen zur immersiven Tendenz wurden jeweils die Mittelwerte gebildet. Bei allen Verfahren entsprechen hohe Werte einer hohen Ausprägung des Merkmals.

1. Deskriptive Ergebnisse und Zusammenhang zu demographischen Daten

Die deskriptiven Werte für die abhängigen Variablen für die einzelnen Versuchspersonen finden sich in Tabelle 5.03. Die Versuchspersonen Nr. 1 bis 11 hatten dabei die Instruktion, die eine hohe Involviertheit induzierte, Nr. 12 bis 23 hatten die Instruktion, die eine niedrige Involviertheit zur Folge haben sollte.

TABELLE 5.03. Deskriptive Werte für jede abhängige Variable pro Versuchsperson.

Vp-Nr.	Präsenz-rating (Mittelwert)	Mittlere Zeit bis zur Beendigung des Durchgangs	Mittlere Geschwindigkeit pro Durchgang	Mittlere Anzahl der bewegten Bausteine pro Durchgang	Standardwert im Leistungsmotivationsinventar	Standardwert im Test d2	Mittelwert im Adaptabilitätsfragebogen	Mittelwert im Fragebogen zur immersiven Tendenz
1	4.99	2.37	18.18	6.42	93	118	0.40	4.42
2	5.50	5.57	19.95	12.82	115	113	.030	3.83
3	5.82	3.98	17.49	11.50	100	99	-0.75	2.17
4	5.52	3.53	27.14	11.64	101	96	0.30	5.33
5	4.36	3.97	19.23	8.25	96	92	0.00	3.58
6	4.60	5.08	18.71	18.08	108	102	0.05	4.17
7	1.88	3.97	22.43	9.42	102	104	0.10	4.58
8	2.68	3.72	21.07	10.33	98	88	0.10	3.08
9	3.10	4.48	15.78	8.50	102	114	0.35	3.83
10	4.89	3.80	20.71	10.33	92	101	-0.30	3.83
11	5.14	1.87	32.90	7.08	103	128	0.95	4.50
12	3.71	3.77	23.71	14.73	98	113	0.35	4.17
13	4.24	3.89	27.10	16.83	109	107	0.15	4.17
14	5.07	2.81	27.81	12.33	94	97	0.35	5.08
15	4.21	3.75	33.92	17.00	96	98	0.35	4.08
16	3.01	4.56	15.77	11.58	92	101	0.00	3.58
17	4.57	5.52	19.90	18.58	100	93	0.65	3.47
18	5.10	2.13	38.61	10.33	96	100	0.45	3.58
19	5.03	3.16	21.92	7.00	116	102	0.45	4.83
20	4.67	4.24	19.47	17.67	94	100	0.15	3.83
21	4.04	2.32	28.22	10.00	104	119	0.45	4.08
22	4.25	2.78	32.40	10.25	95	100	0.60	4.50
23	4.20	3.62	34.72	9.09	102	99	0.15	3.17

Es zeigten sich keine signifikanten Korrelationen zwischen den demographischen Daten und den abhängigen Variablen. Anders als bei der Kontrollgruppe (Studie 1) konnte hier kein Geschlechterunterschied bezüglich der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen und den verbrachten Stunden pro Monat mit Spielen von Computerspielen mit 3D-Graphik aufgefunden werden.

Die Erfahrung mit 3D-Computerspielen zeigte einen signifikanten Zusammenhang im mittelhohen Bereich zu den Mittelwerten des Fragebogens zur immersiven Tendenz, $r_{\text{Spearman}} = .649$, $p = .001$, $n = 23$. Die Versuchspersonen, die mehr Erfahrung mit 3D-Computerspielen hatten, zeigten demnach eine höhere Bereitschaft, sich in eine virtuelle Umwelt hineinzuzusetzen.

Anders als in Studie 1 korrelierten die Mittelwerte des Adaptabilitätsfragebogens positiv mit denjenigen des Fragebogens zur immersiven Tendenz, $r = .561$, $p = .005$, $n = 23$. Die negative Korrelation zwischen immersiver Tendenz und Anpassungsfähigkeit scheint also kein allgemeines Phänomen zu sein, sondern interindividuelle Unterschiede aufzuweisen oder von anderen Variablen abzuhängen.

Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe zeigte mittelhohe Korrelationen zu der Anzahl der bewegten Bausteine pro Durchgang, $r_{\text{Spearman}} = .608$, $p = .002$, und zur mittleren Geschwindigkeit pro Durchgang, $r = -.636$, $p = .001$, jeweils $n = 23$. Diese Korrelationen entsprechen denen aus Studie 1.

Die Werte des Fragebogens zur immersiven Tendenz und die Präsenzratings zeigten hier keine Korrelation. Die Hypothese H_{Pers10} konnte zwar bei der Kontrollgruppe bestätigt werden, in der Experimentalgruppe jedoch nicht. Auch hier scheint es keinen allgemeingültigen Zusammenhang zu geben. Die immersive Tendenz scheint zwar einen positiven Effekt auf das Präsenzempfinden auszuüben, dieser Effekt ist jedoch instabil und kann durch andere Variationen relativ leicht überlagert werden.

Ansonsten zeigten sich keine anderen signifikanten Korrelationen.

2. Effekte der Übung auf das Präsenzempfinden und die Aufgabenleistung

Keine der Versuchspersonen zeigte über alle Durchgänge ein konstantes Präsenzempfinden. Dies steht im Einklang mit dem geringen Vorkommen dieses Verlaufs über das Präsenzempfinden aus Studie 1.

Bei allen Versuchspersonen ergab sich somit eine Veränderung des Verlaufs des Präsenzempfindens über die Durchgänge. Wiederum wurde eine hierarchische Clusteranalyse über die ersten sechs Durchgänge, die als Übungsdurchgänge eingeführt wurden, durchgeführt. Für die Bestimmung der Ähnlichkeiten diente wiederum der Q-Korrelationskoeffizient und es wurde ein hierarchisches agglomeratives Complete-Linkage-Verfahren analog zu Studie 1 verwendet. Bei einem Heterogenitätsmaß von 16 wurden die drei Cluster analog zu Studie 1 aufgefunden, d.h. das Präsenzempfinden stieg entweder kontinuierlich über die Durchgänge an oder fiel kontinuierlich ab oder zeigte ein oszillierendes Verhalten. In dem Cluster mit dem kontinuierlich ansteigenden Präsenzempfinden befanden sich zehn Versuchspersonen, dies entspricht einem Prozentanteil von 43%. Ein kontinuierlich absteigendes Verhalten zeigten fünf der Versuchspersonen (22%), einen oszillierenden Verlauf acht Probanden (35%). Obwohl

also dieselben Cluster gefunden wurden wie in Studie 1, veränderten sich die Prozentanteile der zu den Clustern gehörigen Versuchspersonen. Der Verlauf ist interindividuell verschieden und die Anteile sind nicht in jeder Stichprobe gleich, jedoch konnten die Probanden bereits durch Betrachtung der ersten drei Durchgänge in beiden Studien einer der vier Gruppe zugeordnet werden.

Für die Untersuchung der Übungseffekte auf die Aufgabenleistung wurden die Aufgabenleistungsmaße Zeit bis zur Beendigung eines Durchgangs, Geschwindigkeit pro Durchgang und Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine pro Durchgang über die Versuchspersonen gemittelt. Es wurden nur die ersten sechs Durchgänge berücksichtigt, da hier noch keine Variation stattfand und diese als Übungsdurchgänge dienten. Äquivalent zu Studie 1 wurde mit einer Zeitreihenanalyse über die Durchgänge mittels Regressionsanalyse berechnet, welcher Verlauf für die drei Aufgabenleistungsmaße gilt.

Für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe pro Durchgang wurde die höchste Anpassungsgüte für die Anpassung an eine Potenzfunktion gefunden. Diese Potenzfunktion hatte die Form

$$\text{Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe} = 5.861 \cdot \text{Durchgang}^{-0.339} \text{ min,}$$

$F(1,4) = 26.96$, $p = .007$, $R^2 = .871$. Diese Potenzfunktion entspricht weitgehend der von Studie 1 und folgt demnach ebenso dem Potenzgesetz der Übung.

Für die Geschwindigkeit pro Durchgang konnte hier im Unterschied zur ersten Studie eine Anpassungsfunktion gefunden werden. Die höchste Anpassung fand sich bei einer Potenzfunktion der Form

$$\text{Geschwindigkeit pro Durchgang} = 27.515 \cdot \text{Durchgang}^{-0.098} \text{ mm/s,}$$

$F(1,4) = 24.91$, $p = .008$, $R^2 = .862$. In dieser Studie folgte auch die Geschwindigkeit dem Potenzgesetz der Übung. Der einzige Unterschied zu Anfang verglichen mit der ersten Studie bestand in der Instruktionsbedingung. Daher wurde die Analyse erneut für beide Instruktionsbedingungen getrennt durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die Potenzfunktion nur für die Bedingung, in der die Instruktion eine hohe Involviertheit induzierte, galt, $F(1,4) = 26.47$, $p = .007$, $R^2 = .869$, nicht jedoch für die Bedingung, in der eine geringe Involviertheit hervorgerufen wurde, $F(1,4) = 6.53$, $p = .063$, $R^2 = .620$. Eine hohe Involviertheit führte demnach dazu, dass nicht die individuelle Geschwindigkeit beibehalten wurde, vielmehr bemühten sich die Versuchspersonen darum, eine schnellere Geschwindigkeit einzuüben. Abbildung 5.07 stellt die Geschwindigkeitsverläufe für beide Instruktionsgruppen getrennt dar.

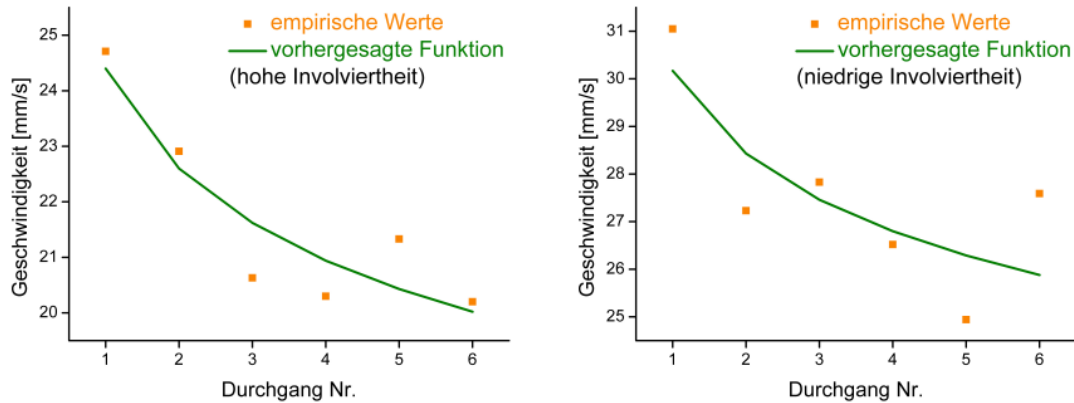


ABBILDUNG 5.07. Verlauf der Geschwindigkeit pro Durchgang für die hochinvolviert induzierende Instruktionsbedingung (links) und die Instruktionsbedingung, die eine niedrige Involviertheit hervorrief (rechts) über die ersten sechs Durchgänge.

Für die Anzahl der bewegten Bausteine pro Durchgang wurde ebenso die höchste Anpassungsgüte für eine Potenzfunktion aufgefunden,

$$\text{Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine} = 16.903 \cdot \text{Durchgang}^{-0.265} \text{ Bausteine,}$$

$F(1,4) = 14.92, p = .018, R^2 = .789$. Dieser Verlauf entspricht wiederum der Funktion, die bereits in Studie 1 ermittelt wurde. Tabelle 5.04 liefert die empirisch ermittelten und durch die Potenzfunktion vorhergesagten Werte für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, für die Geschwindigkeit und für die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine über die ersten sechs Durchgänge. Die darauf folgende Abbildung 5.08 zeigt die Potenzfunktionen für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine.

TABELLE 5.04. Empirisch ermittelte und durch die Potenzfunktion vorhergesagte Werte für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, die Geschwindigkeit und die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine über die ersten sechs Durchgänge in Studie 2.

Durchgang Nr.	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe [min]		Geschwindigkeit [mm/s]		Anzahl bewegter Bausteine	
	empirische Werte	vorhergesagte Werte	empirische Werte	vorhergesagte Werte	empirische Werte	vorhergesagte Werte
1	6.21	5.86	28.17	26.47	18.55	16.90
2	3.96	4.64	25.16	25.48	11.83	14.07
3	4.31	4.04	24.39	24.92	12.70	12.63
4	3.91	3.67	23.55	24.53	12.26	11.71
5	3.38	3.40	23.21	24.23	11.17	11.04
6	3.13	3.20	24.05	23.99	10.70	10.51

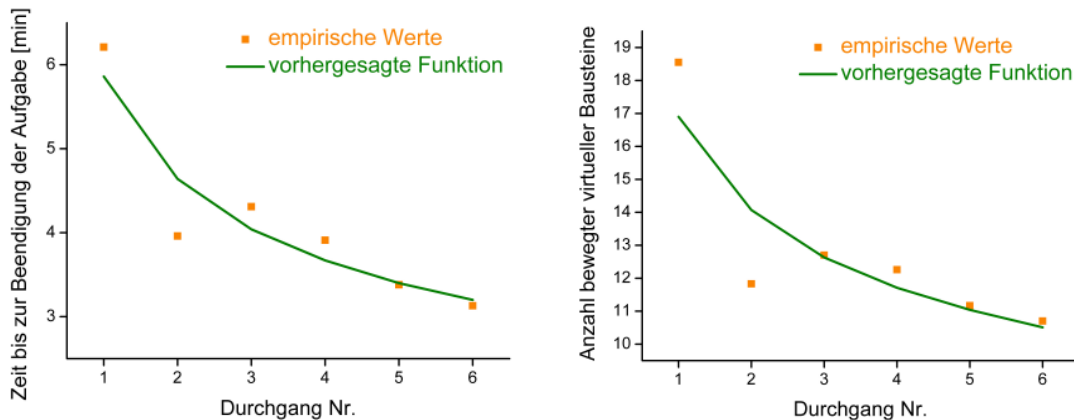


ABBILDUNG 5.08. Potenzfunktionen für die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (links) und die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine (rechts) über die ersten sechs Durchgänge in Studie 2.

3. Effekte der Involviertheit und der Aufmerksamkeitszuweisung auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung

Bei einer hohen Involviertheit wurden eine bessere Aufgabenleistung und ein erhöhtes Präsenzepfinden gegenüber geringer Involviertheit prädiziert. Die deskriptiven Ergebnisse sind in Tabelle 5.03 dargestellt.

TABELLE 5.03. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) für die abhängigen Variablen getrennt nach hoher und niedriger Involviertheit.

		Zeit bis Beendigung der Aufgabe [min]	Geschwindigkeit [mm/s]	Anzahl bewegter Bausteine	Präsenzepfinden
Involviertheit	hoch	3.29 (0.83)	21.74 (6.03)	9.13 (3.43)	4.51 (1.19)
	niedrig	3.24 (0.82)	25.52 (6.01)	11.89 (3.42)	4.43 (1.18)

Aus der Tabelle 5.03 ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit und die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine bei hoher Involviertheit geringer sind als bei niedriger Involviertheit. Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe ist jedoch für beide Involviertheitsbedingungen annähernd gleich. Das Präsenzepfinden ist bei hoher Involviertheit etwas höher als bei niedriger Involviertheit.

Bezüglich der Aufmerksamkeitszuweisung wurde erwartet, dass sich Störungen aus der aktuellen Umgebung dämpfend sowohl auf das Präsenzepfinden als auch auf die Aufgabenleistung auswirken. Störungen aus der virtuellen Umgebung sollten jedoch nur einen mindernden Effekt auf die Aufgabenleistung, nicht auf das Präsenzepfinden ausüben. Irritationen in der virtuellen Umgebung sollten eine geringere Aufgabenleistung bei Personen mit hoher Adaptabilität hervorrufen. Letzterer Effekt sollte sich als Wechselwirkung zwischen Aufmerksamkeitszuweisung und Adaptabilität zeigen. Die folgende Tabelle 5.04 zeigt die deskriptiven Ergebnisse für die abhängigen Variablen getrennt nach den vier Bedingungen der Aufmerksamkeitszuweisung.

TABELLE 5.04. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) für die abhängigen Variablen getrennt nach den vier Bedingungen der Aufmerksamkeitszuweisung.

		Zeit bis Beendigung der Aufgabe [min]	Geschwin- digkeit [mm/s]	Anzahl beweg- ter Bausteine	Präsenz- empfinden
Aufmerk- samkeits- zuweisung	keine Variation	2.89 (1.31)	23.03 (7.54)	9.85 (4.21)	4.58 (1.19)
	Nebenaufgabe in aktueller Umgebung	4.20 (1.56)	24.23 (5.76)	11.81 (5.41)	4.46 (1.18)
	Nebenaufgabe in virtueller Umgebung	3.46 (0.82)	22.96 (6.02)	10.21 (3.67)	4.40 (1.18)
	Irritation in virtueller Umgebung	2.52 (0.74)	24.31 (7.38)	10.17 (4.22)	4.45 (1.19)

Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe ist höher bei den beiden Nebenaufgaben als bei fehlender Variation oder bei aufgabenirrelevanter Irritation aus der virtuellen Umgebung, wobei die aufgabenrelevante Störung aus der aktuellen Umgebung zu einem höheren Anstieg führt als die aufgabenrelevante Störung aus der virtuellen Umgebung. Die Geschwindigkeiten sind über alle vier Bedingungen der Aufmerksamkeitszuweisung sehr ähnlich. Die Anzahl der bewegten Bausteine ist für alle drei Störungsbedingungen etwas höher als bei fehlender Störung. Ebenso ist das Präsenzepfinden gegenüber fehlender Störung bei allen drei Störungsarten leicht erniedrigt, innerhalb der Störungsbedingungen ist das Präsenzepfinden hingegen annähernd gleich.

Um die Hypothesen zur Involviertheit und zur Aufmerksamkeitszuweisung zu untersuchen, wurde eine Kovarianzanalyse mit Messwiederholung, dem Messwiederholungsfaktor Aufmerksamkeitszuweisung (keine Variation, Nebenaufgabe in der aktuellen Umgebung, Nebenaufgabe in der virtuellen Umgebung, vs. Irritation in der virtuellen Umgebung), den abhängigen Variablen Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, Geschwindigkeit pro Durchgang, Anzahl bewegter Bausteine pro Durchgang und Präsenzepfinden pro Durchgang, dem Gruppierungsfaktor Instruktionsbedingung (Induktion von hoher vs. geringer Involviertheit) und der Kovariaten Anpassungsfähigkeit durchgeführt. Für diese Analyse wurden die sechs Experimentalbedingungen, die nach den sechs Übungsdurchgängen folgten, herangezogen.

Tabelle 5.03 stellt die univariaten Haupteffekte für die Aufmerksamkeitszuweisung, die Involviertheit und die Adaptabilität sowie die Interaktionseffekte zwischen Aufmerksamkeitszuweisung und Adaptabilität für jede abhängige Variable dar.

TABELLE 5.03. Haupteffekte und Wechselwirkungen für die Aufmerksamkeitszuweisung, die Involviertheit und die Adaptabilität.

		Quelle	df	F	η^2	<i>p</i>
		innerhalb	Vpn			
Aufmerksam- keitszuweisung	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe		3,60	8.31 ^{a*}	.293	.001
	Geschwindigkeit pro Durchgang		3,60	0.59	.029	.622
	Anzahl bewegter virtueller Bausteine		3,60	0.59	.029	.622
	Präsenzepfinden		3,60	0.79	.038	.505
Aufmerksam- keitszuweisung x Adaptabilität	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe		3,60	0.43	.021	.730
	Geschwindigkeit pro Durchgang		3,60	0.21	.010	.892
	Anzahl bewegter virtueller Bausteine		3,60	0.15	.007	.931
	Präsenzepfinden		3,60	0.10	.005	.960

		zwischen Vpn			
Involviertheit	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe	1,20	0.02	.001	.880
	Geschwindigkeit pro Durchgang	1,20	2.16	.098	.157
	Anzahl bewegter virtueller Bausteine	1,20	3.55	.151	.074
	Präsenzempfinden	1,20	0.03	.001	.876
Adaptabilität	Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe	1,20	6.53*	.246	.019
	Geschwindigkeit pro Durchgang	1,20	4.26	.176	.052
	Anzahl bewegter virtueller Bausteine	1,20	0.88	.042	.359
	Präsenzempfinden	1,20	0.02	.001	.888

^a korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*signifikant auf $\alpha = 5\%$ -Niveau.

Bei der Kovarianzanalyse zeigte sich lediglich ein Effekt der Aufmerksamkeitszuweisung auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe. Mittels Bonferroni-Test als post-hoc-Test wurde ermittelt, dass sich keine Variation von der Störung aus der aktuellen Umgebung unterschied ($p = .001$), die Störung aus der aktuellen Umgebung von der Irritationsbedingung verschieden war ($p < .000$) und die Störung aus der virtuellen Umgebung sich von der Irritationsstörung unterschied ($p = .001$). Somit unterschieden sich die beiden Nebenaufgaben in der aktuellen bzw. virtuellen Umgebung bezüglich der Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe nicht voneinander ($p = .287$). Die Auswirkungen der Verschiebung des Aufmerksamkeitsfokus durch die aufgabenrelevanten Störungen aus der aktuellen und der virtuellen Umgebung folgten dem erwarteten Verlauf, wonach die Aufgabenleistung bei diesen beiden Störungsarten abnehmen sollte.

Bei der Irritation aus der virtuellen Umgebung unterschied sich die Aufgabenleistung nicht gegenüber fehlender Störung ($p = .708$). Dies war wie erwartet, ein Effekt wurde hier nur bei hoher Anpassungsfähigkeit erwartet. Es zeigte sich jedoch keine signifikante Wechselwirkung zwischen Aufmerksamkeitszuweisung und Anpassungsfähigkeit. Möglicher Weise war die eingeführte Irritation nicht stark genug, um den prädierten Effekt für Probanden mit hoher Anpassungsfähigkeit zu evozieren. Dies kann hier nicht abschließend geklärt werden und bedarf weiterer Forschung. Abbildung 5.09 zeigt die gefundenen Effekte der Aufmerksamkeitszuweisung auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe.

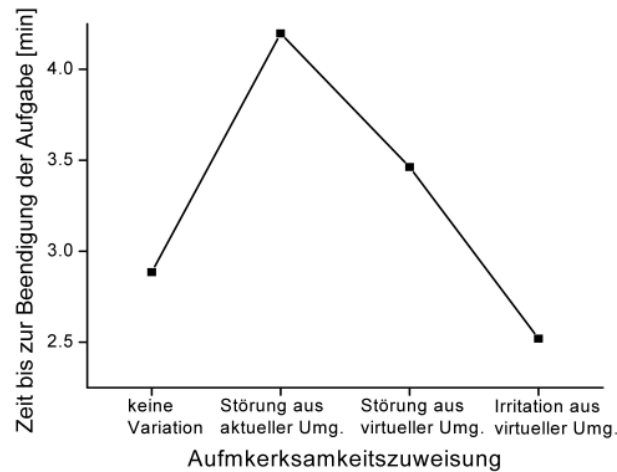


ABBILDUNG 5.09. Haupteffekt der Aufmerksamkeitszuweisung auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe in Studie 2.

Die Aufmerksamkeitszuweisung hatte keinen Effekt auf die anderen Aufgabenleistungsmaße, d.h. weder auf die Geschwindigkeit noch auf die Anzahl bewegter virtueller Bausteine.

Entgegen der Vorhersage zeigte die Aufmerksamkeitszuweisung keine Effekte auf das Präsenzepfinden. Wie erwartet war das Präsenzepfinden bei aufgabenrelevanten und aufgabenirrelevanten Störungen aus der virtuellen Umgebung gleich wie bei fehlender Störung, jedoch sollte sich eine Minderung des Präsenzerlebens bei Störungen aus der aktuellen Umgebung einstellen. Dieser fehlende Effekt kann demnach nicht durch die Verschiebung des Aufmerksamkeitsfokus erklärt werden und bedarf weiterer Forschung.

Auch die Involviertheit zeigte entgegen der Vorhersage keine Effekte auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung, obwohl deskriptiv die Tendenz in die prädierte Richtung erkennbar war. Möglicher Weise muss die Involviertheit stärker induziert werden, damit sich die Verbesserung der Aufgabenleistung und des Präsenzepfindens stärker bemerkbar machen.

Bei der Anpassungsfähigkeit zeigte sich ein überraschender Effekt. Gering anpassungsfähige Versuchspersonen zeigten eine verlängerte Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe im Vergleich zu hoch anpassungsfähigen Probanden. Dieser Effekt wurde nicht vorhergesagt. In Studie 1 wurde zudem kein Effekt der Adaptabilität auf die Aufgabenleistung festgestellt. Wodurch dieser in Studie 2 zustande gekommen ist, ist unklar und bedarf weiterer Studien zur Klärung dieses Effekts. Die Abbildung 5.10 zeigt den gefundenen Effekt der Anpassungsfähigkeit auf die Aufgabenleistung. Mittels Mediansplit wurden dabei hoch von gering adaptiblen Versuchspersonen getrennt.

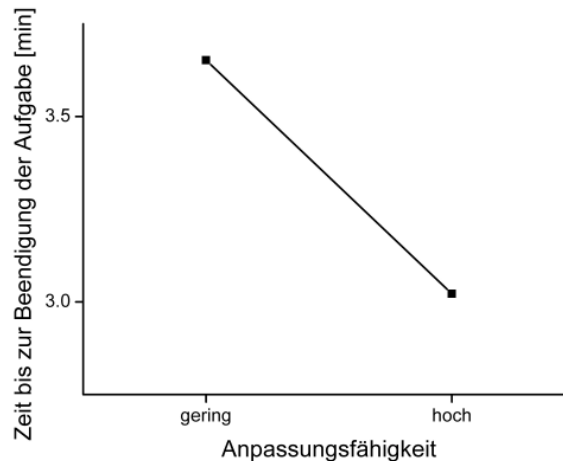


ABBILDUNG 5.10. Haupteffekt der Anpassungsfähigkeit auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe in Studie 2. Bei der Anpassungsfähigkeit wurden mittels Mediansplit hoch von gering anpassungsfähigen Probanden getrennt.

5.6. Zusammenfassung und Gestaltungshinweise

In den beiden Studien wurden die Effekte der Persönlichkeitseigenschaften und –variablen Übung, Leistungsmotivation, Konzentrationsfähigkeit, Involviertheit, Anpassungsfähigkeit und Verteilung von Aufmerksamkeitsressourcen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden untersucht. Die Leistungsmotivation und die Konzentrationsfähigkeit wurden mit bereits validierten Fragebögen erfasst, für die Anpassungsfähigkeit wurde ein eigener Fragebogen konstruiert und validiert. Dieser zeigte eine hohe interne Konsistenz.

Im Abschnitt 5.2. wurde eine Reihe von Hypothesen zum Einfluss von Persönlichkeitseigenschaften und -variablen aufgestellt. Tabelle 5.04 liefert eine Übersicht, inwiefern diese Hypothesen bestätigt werden konnten oder nicht.

TABELLE 5.04. Übersicht über die aufgestellten Hypothesen und deren Bestätigung hinsichtlich des Einflusses von Persönlichkeitseigenschaften und –variablen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden.

Hypothesen		Erläuterung
H_{Pers1} : Über die Übungsdurchgänge verändert sich das Präsenzepfinden interindividuell unterschiedlich. Es ergeben sich zwei Gruppen von Versuchspersonen, die entweder einen kontinuierlichen Anstieg oder einen kontinuierlichen Abfall im Präsenzepfinden zeigen.	bestätigt	In beiden Studien wurden insgesamt vier Cluster von Versuchspersonen gefunden. Die Gruppen zeigten entweder einen kontinuierlichen Anstieg, einen kontinuierlichen Abfall, einen oszillierenden Verlauf oder einen konstanten Verlauf für das Präsenzepfinden über die Übungsdurchgänge. Die prozentualen Zugehörigkeiten der Probanden zu den einzelnen Clustern variierten jedoch über die beiden Studien.

Hypothesen		Erläuterung
H_{Pers2} : Über die Übungsdurchgänge folgt die Aufgabenleistung, insbesondere die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, dem Potenzgesetz der Übung.	bestätigt	Bei beiden Studien folgten die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und die Anzahl der bewegten virtuellen Bausteine pro Durchgang dem Potenzgesetz der Übung. Bei der ersten Studie behielten die Probanden ihre individuelle Geschwindigkeit bei. Bei der zweiten Studie zeigte sich bei hoher Involviertheit, dass die Geschwindigkeit dem Potenzgesetz der Übung folgte, die Probanden also ihre Geschwindigkeit verbesserten. Dies galt jedoch nicht bei niedriger Involviertheit.
H_{Pers3} : Bei gut geübter Aufgabe und niedriger Leistungsmotivation verschlechtern sich das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung.	nicht bestätigt	Bei gut geübter Aufgabe zeigten sich keine Effekte der Leistungsmotivation auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung. Ebenso zeigte die Konzentrationsfähigkeit keine Auswirkungen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung.
H_{Pers4} : Bei gut geübter Aufgabe und hoher Leistungsmotivation ändert sich das Präsenzepfinden nicht bzw. wird erhöht. Ist zusätzlich die Konzentrationsfähigkeit gering, sinkt die Aufgabenleistung, ist es hoch, bleibt die Aufgabenleistung gleich.	nicht bestätigt	
H_{Pers5} : Bei hoher Anpassungsfähigkeit ist die Veränderung im Präsenzepfinden, die mit zunehmender Übung einhergeht, stärker als bei niedriger Adaptabilität.	nicht bestätigt	Hoch anpassungsfähige Probanden zeigten einen geringeren Betrag der Steigung des Präsenzepfindens als gering anpassungsfähige Versuchspersonen. Für die negative Korrelation zwischen Adaptabilität und Präsenzepfinden sind demnach nicht strukturelle Aspekte wie unterschiedliche Steigungen verantwortlich, sondern es scheint einen inhaltlichen Zusammenhang zu geben, der hier nicht abschließend geklärt werden konnte.
H_{Pers6} : Bei gut geübter Aufgabe zeigt die Involviertheit dieselben vermuteten Effekte wie die Variation der Leistungsmotivation unabhängig von deren individueller Ausprägung.	nicht bestätigt	Bei gut geübter Aufgabe zeigte die Involviertheit keinerlei Effekte auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung.
H_{Pers7} : Störungen aus der aktuellen Umgebung mindern die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden.	teilweise bestätigt	Störungen aus der aktuellen Umgebung hatten negative Effekte auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, zeigten jedoch keine Auswirkungen auf die anderen Aufgabenleistungsmaße und auch keine Effekte auf das Präsenzepfinden.
H_{Pers8} : Aufgabenrelevante Störungen aus der virtuellen Umgebung mindern die Aufgabenleistung, jedoch nicht das Präsenzepfinden.	teilweise bestätigt	Störungen aus der virtuellen Umgebung hatten negative Effekte auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, zeigten jedoch keine Effekte auf die anderen Aufgabenleistungsmaße. Wie erwartet wurden keine Auswirkungen auf das Präsenzepfinden gefunden.
H_{Pers9} : Irritationen aus der virtuellen Umgebung wirken sich nur bei Personen mit hoher Anpassungsfähigkeit mindernd auf die Aufgabenleistung aus.	nicht bestätigt	Irritationen aus der virtuellen Umgebung hatten keinen Einfluss auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden. Es zeigten sich keine Effekte der Anpassungsfähigkeit.
H_{Pers10} : Die immersive Tendenz hat einen positiven Einfluss auf das Präsenzepfinden.	teilweise bestätigt	In Studie 1 hingen die immersive Tendenz und das Präsenzepfinden positiv zusammen, diese Beziehung konnte in Studie 2 nicht bestätigt werden. Die Korrelation zwischen immersiver Tendenz und Präsenzepfinden scheint instabil zu sein und relativ einfach durch andere Variationen überlagert werden zu können.

Bezüglich der Variablen Übung war bereits nach wenigen Durchgängen erkennbar, in welches der vier aufgefundenen Cluster (konstanter Verlauf, oszillierender Verlauf, kontinuierliche Zunahme, kontinuierliche Abnahme des Präsenzepfindens) die jeweilige Versuchsperson fällt. Für die Entwicklung des Präsenzepfindens spielen demnach motivationale Haltungen der Probanden eine Rolle. Die Clusterzugehörigkeit wirkte sich jedoch weder auf die Aufgabenleistung noch auf das Präsenzepfinden aus. Bei Telepräsenzanwendungen muss somit nicht auf diese Tendenz der Probanden geachtet werden. Inwiefern diese interindividuell unterschiedlichen Tendenzen beeinflusst werden können und welche möglichen positiven Effekte dies hat, muss in zukünftigen Studien geklärt werden.

Bei rein motorischen Aufgaben wie in den beiden in diesem Kapitel realisierten Studien spielt weder die Leistungsmotivation noch die Konzentrationsfähigkeit eine Rolle, auf diese muss in Telepräsenzanwendungen ebenso wenig geachtet werden. Möglicher Weise kommen diese beiden Persönlichkeitseigenschaften bei anderen Aufgabentypen wie beispielsweise Denk- oder Problemlöseaufgaben zum Tragen, ob die beiden Eigenschaften dann zusätzlich erhoben werden sollten, um die Probanden mit der höchsten Aussicht auf eine gute Aufgabenleistung und ein hohes Präsenzepfinden zu selektieren, bedarf weiterer Forschung.

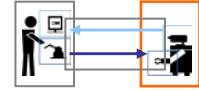
Die Anpassungsfähigkeit zeigte in der zweiten Studie einen Effekt auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, hier erzielten hoch anpassungsfähige Versuchspersonen eine bessere Aufgabenleistung als gering anpassungsfähige Personen. Ob dieser Effekt systematisch zustande gekommen ist, muss weiter untersucht werden. Jedoch lässt sich aus der vorliegenden Studie ableiten, dass bei Telepräsenzanwendungen, bei denen die Bearbeitungszeit ein kritischer Faktor ist, eher Benutzer mit einer hohen Adaptabilität ausgewählt werden sollten, um motorische Aufgaben zu absolvieren.

Störungen aus der aktuellen und virtuellen Umgebung wirkten sich negativ auf die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, jedoch nicht auf die anderen Aufgabenleistungsmaße Geschwindigkeit pro Durchgang und Anzahl der bewegten virtuellen Objekte, aus. Bei zeitkritischen Telepräsenzaufgaben sollten solche Störungen unbedingt vermieden werden. Irritationen aus der virtuellen Umgebung hingegen zeigten keinerlei Auswirkung auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden, d.h. ein kurzer technischer Ausfall eines Systems wie beispielsweise der Bildübertragung sollte sich bei Telepräsenzanwendungen nicht negativ auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden niederschlagen.

Es erwies sich von Vorteil, eine hohe Involviertheit der Benutzer bei telemanipulativen Aufgaben zu erzielen. Bei hoch involvierten Versuchspersonen zeigte sich, dass die ansonsten individuell relativ konstante Bearbeitungsgeschwindigkeit dem Potenzgesetz der Übung folgte, d.h. die Probanden bemühten sich, ihre Leistung zu verbessern.

Die immersive Tendenz schließlich hatte zwar einen positiven Effekt auf das Präsenzepfinden, jedoch war dieser Effekt nicht stabil und konnte leicht überdeckt werden.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Prozesse, die zum Präsenzepfinden und zur Aufgabenleistung beitragen, zum größten Teil durch die Aufmerksamkeitszuweisung und durch motivationale Effekte erklärbar sind, jedoch eine nicht aufgeklärte Varianz durch weitere, hier nicht untersuchte Drittvariablen und weitere kognitive Prozesse, besteht.



6. Einfluss von rückgemeldeten Informationen aus der entfernten Umgebung auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden

In diesem Kapitel werden die Informationen, die aus der entfernten Umgebung rückgemeldet werden, behandelt. Im ersten und zweiten Kapitel dieser Arbeit wurde bereits ausgeführt, dass die gefundene Aufgabenabhängigkeit bezüglich Aufgabenleistung und Präsenzerleben vor allem in diesem Bereich liegt. Verschiedene Aufgaben erfordern verschiedene rückzumeldende Informationen aus der entfernten Umgebung in unterschiedlicher Auflösung. So ist es beispielsweise bei einer reinen Supervisionsaufgabe bei einer telepräsenten Anwendung nicht erforderlich, haptische Rückmeldung an den Benutzer zu liefern. Bei telepräsenten Unterwasseroperationen mit schlechter Sicht, z.B. bei der Detektion von Bruchstellen bei Unterwasserkabeln, sollte dagegen die Haptik gut aufgelöst dargestellt werden (z.B. Sheridan, 1992a; Burdea, 1996).

Zudem spielt die Güte des Systems eine entscheidende Rolle. Bei einem Teleaktionssystem, bei dem z.B. die haptischen Informationen nur sehr verzerrt zurückgemeldet werden können und die Gefahr besteht, dass die Wahrnehmung extrem verfälscht wird, ist zu überdenken, ob diese haptische Rückmeldung tatsächlich gegeben werden soll. Bei telepräsenten minimal invasiver Roboterchirurgie sollte man sicherlich auf diese Rückmeldung verzichten, bei einer Anwendung im Entertainment-Bereich könnte man eine Verfälschung der haptischen Wahrnehmung dagegen in Kauf nehmen (z.B. Brooks, 1990; Watson, Walker, Ribarsky & Spaulding, 1998).

Auf Grund der Vielfalt an Aufgaben und Arten von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen kann der Einfluss von rückgemeldeten Informationen aus der entfernten Umgebung auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben nicht erschöpfend untersucht werden. In diesem Kapitel werden beispielhaft zwei Studien vorgestellt, bei denen die entfernten Informationen variiert dargeboten und deren Einfluss auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben erfasst werden. Bei der ersten vorgestellten Studie wird als Schwerpunkt die Rückmeldung von visuellen Informationen aus der entfernten Umgebung betrachtet, bei der zweiten Studie steht die Darstellung von haptischen Informationen im Vordergrund.

6.1. Variation der visuellen Informationen aus der entfernten Umgebung und deren Einfluss auf Aufgabenleistung und Telepräsenzempfinden

In Kooperation mit dem Institut für Realzeit-Computersysteme der Technischen Universität München (Hauptverantwortliche: Jan Leupold und Stephan Behrendt) wurden die Effekte eines erweiterten Gesichtsfeldes bei der visuellen Rückmeldung einer entfernten Szene über ein Head Mounted Display (HMD) auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben untersucht.

Das visuelle Bild, das über das HMD präsentiert werden kann, ist normalerweise durch die Kameraoptik beschränkt und kann auch nicht durch eine bessere Hardware erweitert werden.

Um das Gesichtsfeld des Benutzers zu vergrößern, wurde ein prädiktives Display entwickelt (Burkert, Leupold & Passig, 2004). Dieses kann für die Erweiterung des

Kamerabildes um ein photorealistisches virtuelles Modell der entfernten Szene benutzt werden, also für die Generierung des sogenannten „hybriden Displays“ (Leupold & Behrendt, 2005).

Es konnte gezeigt werden, dass eine Kombination von realen Kameraansichten mit einem virtuellen Modell benutzt werden kann, um verborgene oder verdeckte Objekte zu visualisieren (Furmanski, Azuma & Daily, 2002; Dai, 2001). Dabei wurden positive Effekte bezüglich der Aufgabenleistung beobachtet, so z.B. eine bessere Reaktionszeit bei telepräsenten Chirurgieanwendungen (Chios & Linney, 2004) oder eine höhere Anzahl erinnerter Objekte (Macchiarella & Vincenzi, 2004).

Bei Telepräsenz Anwendungen, bei denen ein HMD zur visuellen Rückmeldung der entfernten Szene eingesetzt wurde, konnten Beeinträchtigungen bei Aufgabenleistungen, die von der visuellen Rückmeldung abhängen, gefunden werden. Diese Effekte betreffen die Distanzschätzung, Suchaufgaben und Detektionsaufgaben sowie das Komfortempfinden. Es gibt Hinweise darauf, dass diese negativen Effekte auf Grund des eingeschränkten Gesichtsfelds zustande kommen (Alfano & Michel, 1990; Semmlow, Gauthier & Vercher, 1990; Low, Welch, Lastra & Fuchs, 2001; Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000).

Einige Studien fanden, dass die negativen Effekte auf die Aufgabenleistung bei der Rückmeldung über ein HMD abgemildert werden konnten, wenn visuelle Informationen im peripheren Gesichtsfeld bereitgestellt bzw. wenn Kopfbewegungen des Operators zugelassen wurden (Willemsen & Gooch, 2002; Creem-Regehr, Willemsen, Gooch & Thompson, 2003; Witmer & Kline, 1998; Jay & Hubbard, 2005).

Psotka, Lewis & King (1998) konnten zeigen, dass Benutzer ihr natürliches Gesichtsfeld (120° vertikal, 180 bis 200° horizontal) als den primären Standard für Distanzschätzungen, für die Richtungswahrnehmung und für die Wahrnehmung der Eigenbewegung nutzen.

Die visuelle Information im peripheren Gesichtsfeld erwies sich sogar dann bei visuellen Objektsuchaufgaben als nützlich für die Aufgabenleistung, wenn das periphere Bild nicht für die Aufgabe benötigt wurde (Low, Ilie, Welch & Lastra, 2003; Ilie, Low, Welch, Lastra, Fuchs & Cairns, 2004; Waller, 1999).

Daraus kann geschlossen werden, dass eine Bereitstellung visueller Informationen im peripheren Gesichtsfeld zu einer Reduktion der visuellen Belastung führt, es stehen dann mehr Kapazitäten für die Erfüllung der eigentlichen Aufgabe zur Verfügung.

Bisher wurde angenommen, dass ein erweitertes Gesichtsfeld zu einem höheren Telepräsenzerleben führt, dies wurde auch in empirischen Studien bestätigt (Tang, Wong & Heng, 2005; Rosenblum & Macedonia, 2005; s. Kap. 2).

Durch das entwickelte hybride Display wird ebenfalls das Gesichtsfeld erweitert und es werden Informationen in der visuellen Peripherie zur Verfügung gestellt. Um die Effekte des hybriden Displays im Vergleich zur reinen Kameransicht zu prüfen, wurde die entfernte Szene über ein HMD (Sony LDI-D100BE; Auflösung 640 x 480, Bildwiederholungsfrequenz 33 fps) an den Benutzer rückgemeldet. Die Rotationsbewegungen des Kopfes des Benutzers wurden dabei in Echtzeit aufgezeichnet. Der Benutzer erhielt somit ein dynamisches Kamerabild, das seinen rotatorischen Kopfbewegungen folgte. Jedoch besitzt die der Kopfbewegung nachfolgende Kamera eine Geschwindigkeit von 0.5 rad/s, so dass die meisten Folgebewegungen der Kamera langsamer waren als die Kopfbewegungen des

Menschen. Das Kamerabild erschien somit langsam im Gesichtsfeld des Benutzers und bewegte sich so lange, bis die Endposition, die derjenigen des Benutzers entsprach, eingenommen war. Bei einer visuellen Rückmeldung des Kamerabildes allein ist die von der Kamera nicht erfasste Szene schwarz dargestellt.

Zusätzlich ist durch die Kameraoptik das über das HMD dargestellte Bild auf ein Gesichtsfeld von 28.7° vertikal und 37.9° horizontal beschränkt. Durch die Erweiterung des Kamerabildes mit einem photorealistischen Modell wurde das Gesichtsfeld auf 31.5° vertikal und 41.4° horizontal vergrößert. Während diese Verbesserung im statischen Fall vernachlässigbar ist, führt das hybride Display dazu, dass bei den langsamen Kamerafolgebewegungen kein schwarzes Bild für die von der Kamera nicht erfassten Szenenelemente gezeigt, sondern die Szene als photorealistentes virtuelles Modell dargestellt wird. Da dieses Modell qualitativ nicht von der Kamerasicht unterscheidbar ist, bemerkt der Benutzer das „Nachziehen“ des Kamerabildes nicht. Abbildung 6.01 stellt einen Ausschnitt der in diesem Experiment dargestellte Szene ohne und mit Erweiterung mit dem photorealistischen virtuellen Modell dar.



ABBILDUNG 6.01. Ausschnitt der dargestellten Szene ohne (links) und mit (rechts) Erweiterung mit dem photorealistischen virtuellen Modell.

Ein Nachteil des photorealistischen virtuellen Modells besteht darin, dass dieses im Vorfeld generiert wird und visuelle Szenenänderungen, die nach der Generierung des Modells stattgefunden haben, nicht enthalten sind. Diese veränderten Informationen werden nur im Kamerabild sichtbar.

Auf Grund der theoretischen Vorüberlegungen werden beim Vergleich der Aufgabenleistung und des Telepräsenzempfindens zwischen der reinen Kamerasicht und der mit dem photorealistischen virtuellen Modell erweiterten Kamerasicht (hybrides Display) folgende Hypothesen aufgestellt:

H_{HDI}: Beim hybriden Display stehen dem Benutzer durch das erweiterte Gesichtsfeld mehr visuelle Aufmerksamkeitsressourcen zu Verfügung als bei der reinen Kamerasicht.

Dies zeigt sich darin, dass bei der Rückmeldung mit dem hybriden Display mehr kleine Objekte erinnert werden als bei der Rückmeldung der reinen Kamerasicht.

H_{HD2}: Bei der visuellen Darstellung der entfernten Szene mit dem hybriden Display kommt es zu einer besseren Distanzschätzung als mit der reinen Kamerasicht.

H_{HD3}: Die Genauigkeit der erinnerten Position von Objekten in einer präsentierten Szene ist bei der visuellen Rückmeldung über das hybride Display besser als bei derjenigen über die reine Kamerasicht.

H_{HD4}: Es wird erwartet, dass die Darstellung über das hybride Display zu einem höheren Telepräsenzerleben führt als die Darstellung über die reine Kamerasicht.

Die Aufgabenleistung wurde in dem Experiment demnach als Anzahl der erinnerten Objekte, Distanzschätzung und Genauigkeit der erinnerten Position von Objekten erhoben. Das Telepräsenzerleben wurde mittels der Ratingfrage „Wie stark fühlten Sie sich in die entfernte Umgebung hineinversetzt?“ (siebenstufige Ratingskala; 1 = sehr schwach, 7 = sehr stark), die dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) entnommen wurde, erfasst.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wurde den Versuchspersonen eine Beispielszene über das HMD präsentiert, damit diese sich an das System und an das HMD gewöhnen konnten. Diese Szene wurde ebenfalls benutzt, um den individuellen Augenabstand beim HMD einzustellen, so dass jede Versuchsperson einen visuell dreidimensionalen Eindruck der Szene erhielt. Während des Versuchs wurden die rotatorischen Kopfbewegungen der Probanden von den Kameras nachverfolgt. Die Versuchspersonen konnten sich die gesamte Szene ansehen, es war ihnen jedoch nicht möglich, ihre Position zu ändern.

Nach dieser Eingewöhnungsphase wurde den Versuchspersonen die experimentelle Szene, die als Panoramabild in Abbildung 6.02 dargestellt ist, für eine Dauer von 25 s dargeboten. Die dargestellte Szene enthielt vier kleine Objekte, nämlich eine grüne Schachtel, eine blaue Flasche, einen Rauchverbotaufkleber und einen gelben Ball (die Objekte sind in Abbildung 6.02 zusätzlich gekennzeichnet). Zwei dieser Objekte, das Rauchverbotsschild und die grüne Schachtel, wurden in das photorealistische Modell implementiert, die anderen beiden Objekte waren nur im Kamerabild sichtbar. Diese Bedingung wurde eingeführt, um ein reales Anwendungsszenario, bei dem das virtuelle Modell noch nicht auf veränderte visuelle Informationen angepasst ist, nachzustellen und die auftretenden Effekte zu untersuchen.

Die Darstellung über das hybride Display bzw. über die reine Kamerasicht wurde über die Versuchspersonen als Gruppierungsfaktor balanciert. Die Probanden erhielten davor die Instruktion, dass sie sich lediglich etwas in der entfernten Szene umschaun sollten. Nach den 25 s Darbietungsdauer der Szene wurde den Probanden die Frage zur Erfassung des Telepräsenzempfindens („sich hineinversetzt fühlen“) gestellt. Danach wurden die Versuchspersonen befragt, ob sich eine grüne Schachtel, eine blaue Flasche, ein Rauchverbotsschild oder ein gelber Ball in der Szene befunden hatte. Bei einer positiven Antwort sollten die Versuchspersonen ihre Distanz zu den entdeckten Objekten einschätzen. Zusätzlich wurde ihnen ein Screenshot der Szene ohne die Objekte vorgelegt, in dem sie die erinnerten Objekte mit einem Stift einzeichnen sollten. Vor der Präsentation der Szene

wurden den Versuchspersonen keinerlei Hinweise gegeben, dass sie zu dieser Szene auf diese Weise befragt werden.

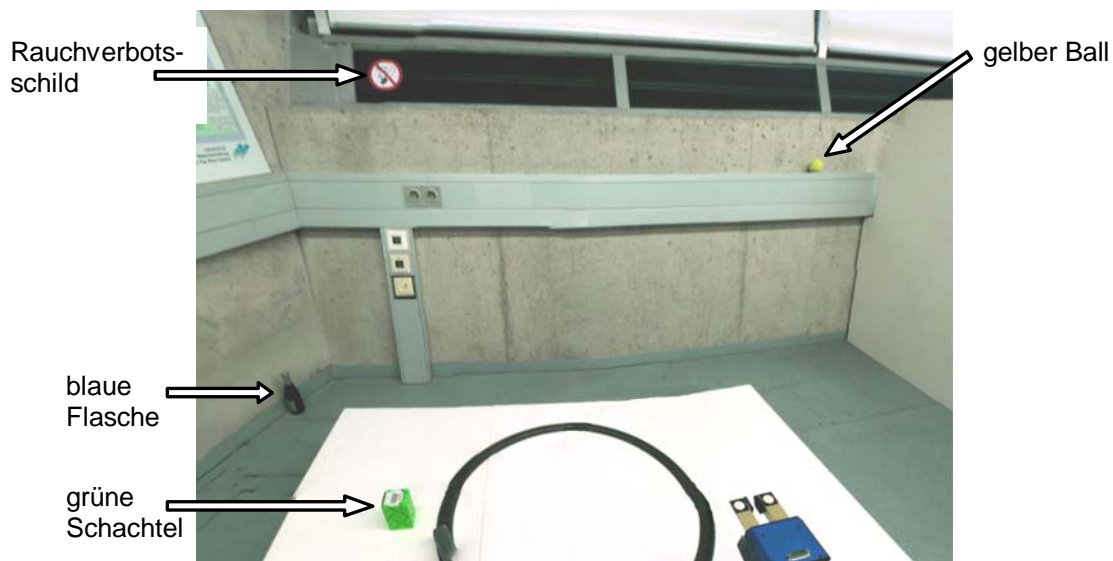


ABBILDUNG 6.02. Visuell rückgemeldete entfernte Szene als Panoramabild.

Am Ende des Versuchs füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Tragen einer Brille bzw. von Kontaktlinsen, Grad der Erfahrung mit HMDs (fünfstufiges Rating von keine bis sehr viel) und verbrachte Stunden im Monat mit Computerspielen mit 3D-Graphik, enthielt. Zusätzlich erhielten die Versuchspersonen den Teil des Fragebogens von Scheucherpflug (2001), der die immersive Tendenz als Persönlichkeitseigenschaft misst (elf Fragen).

Methode

a) Design

Die abhängigen Variablen waren die Anzahl der erinnerten Objekte, die Distanzschätzung für die erinnerten Objekte, die Genauigkeit der eingezeichneten Position auf dem Screenshot sowie das Telepräsenzempfinden, das mittels der Ratingfrage erfasst wurde.

Die unabhängige Variable war die Erweiterung der Kamerasicht mit dem photorealistischen virtuellen Modell (ja vs. nein). In der Gruppe mit dem hybriden Display wurde als zusätzlicher Faktor die „Implementierung in das virtuelle Modell“ (ja bei grüner Schachtel und Rauchverbotschild vs. nein bei blauer Flasche und gelbem Ball) eingeführt.

b) Stichprobe

37 Versuchspersonen nahmen an diesem Experiment teil. 18 von ihnen erhielten die reine Kamerasicht, 19 das hybride Display.

Alle Probanden waren Rechtshänder. Darunter waren zehn Frauen und 27 Männer im Alter zwischen 21 und 67 Jahren (Mittelwert 32.08 Jahre, Standardabweichung 12.93 Jahre). Alle waren normalsichtig bzw. auf Normalsicht korrigiert. 14 trugen keine Brille und auch keine

Kontaktlinsen, fünf gaben an, eine Brille nur bei bestimmten Gelegenheiten (Autofahren, Lesen) zu tragen und 18 trugen permanent eine Brille oder Kontaktlinsen. 35

Versuchspersonen hatten keine bis mittlere vorherige Erfahrung mit HMDs, zwei gaben an, viel bzw. sehr viel Erfahrung mit dem HMD zu haben. Von den Probanden wurden durchschnittlich 2.04 Stunden pro Monat mit 3D-Computerspielen verbracht (Standardabweichung 5.35 Stunden, Bereich zwischen 0 und 27.50 Stunden).

Der Mittelwert der immersiven Tendenz als Persönlichkeitsvariable über alle Versuchspersonen betrug 4.05 (Standardabweichung 1.05, individuelle Mittelwerte zwischen 2.09 und 6.36).

Ergebnisse

Die Anzahl der erinnerten Objekte wurde direkt den Angaben der Versuchspersonen entnommen. Die Güte der Distanzschätzung wurde als absolute Differenz zwischen tatsächlicher und eingeschätzter Distanz in m berechnet. Die Genauigkeit der erinnerten Position wurde als euklidische Distanz zwischen der markierten Position und der tatsächlichen Position des jeweiligen Objekts auf dem Screenshot in cm ermittelt. Das abgegebene Rating der Probanden zur Erfassung des Telepräsenzempfindens wurde notiert.

Keiner der demographischen Daten zeigte eine Korrelation mit einer der abhängigen Variablen. Ebenso ergab sich kein Zusammenhang zwischen der immersiven Tendenz und den abhängigen Variablen. Die Telepräsenzratings wurden somit auf Grund der experimentellen Variation, nicht auf Grund der immersiven Tendenz als Persönlichkeitsvariable, abgegeben.

Zwischen der Anzahl der erinnerten Objekte und dem Telepräsenzrating ergab sich keine signifikante Korrelation, hier konnte demnach kein Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Telepräsenzempfinden aufgedeckt werden ($r_{\text{Spearman}} = -.025$, $p = .881$).

Der Median der erinnerten Objekte belief sich in der Bedingung mit reiner Kamerasicht auf 1.33 (mittlerer Quartilabstand 1.30), in der Bedingung mit dem hybriden Display dagegen auf 2.31 (mittlerer Quartilabstand 1.67). Die Versuchspersonen erinnerten also bei der Darstellung über das hybride Display ca. ein Objekt von vier Objekten mehr. Dieser Unterschied erwies sich als signifikant, $U = 88.00$, $p = .009$.

Im Detail betrachtet kam dieser Unterschied durch die Objekte, die im virtuellen Modell implementiert waren, zustande. Der Median für das Erinnern an die grüne Schachtel und an das Rauchverbotsschild betrug 0.29 (mittlerer Quartilabstand 0.82) in der Bedingung mit der reinen Kamerasicht, beim hybriden Display betrug der Median 1.47 (mittlerer Quartilabstand 1.31). Der Unterschied der beiden erinnerten Objekte zwischen Kamerasicht und hybridem Display war signifikant, $U = 63.5$, $p < .000$. Dagegen war der Median für die Erinnerung der anderen beiden Objekte in der Kamerasicht 1.27 (mittlerer Quartilabstand 0.87) und beim hybriden Display 1.48 (mittlerer Quartilabstand 0.79). Dieser Unterschied zwischen den beiden Darstellungsarten war nicht signifikant, $U = 162.50$, $p = .781$. Die Objekte, die also während der Darbietung der Szene ständig im peripheren Blickfeld blieben, wurden häufiger erinnert als Objekte, die nur im zentralen Blickfeld gesehen werden konnten. Die bereits bestehenden Ergebnisse aus der Literatur zum peripheren Gesichtsfeld und somit die

Hypothese H_{HD1} konnten bestätigt werden, wonach beim hybriden Display mehr Details erinnert werden als bei der reinen Kamerasicht.

Weiterhin wurde erwartet, dass beim hybriden Display die Distanzschätzung besser ist als bei der reinen Kamerasicht (Hypothese H_{HD2}). Die durchschnittliche Abweichung zwischen geschätzter und realer Distanz betrug bei der reinen Kamerasicht 0.86 m (Standardabweichung 0.52 m), beim hybriden Display dagegen 0.45 m (Standardabweichung 0.25 m). Dieser Unterschied erwies sich als signifikant, $t(31) = 2.88, p = .009$. Auch die Hypothese H_{HD2} wurde somit bestätigt.

Bei der Genauigkeit der erinnerten Position der identifizierten Objekte betrug die Abweichung zwischen Ist- und Sollposition auf dem Screenshot bei der reinen Kamerasicht durchschnittlich 2.00 cm (Standardabweichung 1.76 cm), beim hybriden Display 2.76 cm (Standardabweichung 1.99 cm). Dieser Unterschied war nicht signifikant, $t(31) = -1.17, p = .253$. Die Hypothese H_{HD3} , wonach die Genauigkeit beim hybriden Display höher sein sollte, konnte nicht bestätigt werden. Möglicher Weise hatten die Versuchspersonen Schwierigkeiten damit, die gesehene dreidimensionale Szene kognitiv auf dem zweidimensionalen Screenshot abzubilden. Dieser Effekt kann hier nicht abschließend geklärt werden.

Bezüglich des Telepräsenzerlebens belief sich der Mittelwert bei der reinen Kamerasicht auf 3.72 (Standardabweichung 1.32) und beim hybriden Display auf 4.63 (Standardabweichung 1.21). Das Telepräsenzerleben war beim hybriden Display gegenüber der reinen Kamerasicht erhöht, dieser Effekt erwies sich als signifikant, $t(35) = -2.19, p = .036$ und wurde in Hypothese H_{HD4} vorhergesagt.

Tabelle 6.01 gibt eine Übersicht über die Bestätigung der aufgestellten Hypothesen.

TABELLE 6.01. Übersicht über die Bestätigung der aufgestellten Hypothesen zum Einfluss der Variation der visuellen Rückmeldung.

Hypothesen		Erläuterung
H_{HD1} : Durch die Erweiterung des Gesichtsfelds beim hybriden Display werden mehr Details erinnert als bei der reinen Kamerasicht.	bestätigt	Beim hybriden Display wurden von vier Detailobjekten durchschnittlich eines mehr erinnert als bei der reinen Kamerasicht.
H_{HD2} : Beim hybriden Display ist die Distanzschätzung besser als bei der reinen Kamerasicht.	bestätigt	Die Differenz zwischen tatsächlicher und eingeschätzter Distanz war beim hybriden Display geringer.
H_{HD3} : Beim hybriden Display ist die Genauigkeit der erinnerten Position von Objekten höher als bei der reinen Kamerasicht.	nicht bestätigt	Es konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Genauigkeit der erinnerten Positionen der Objekte zwischen hybridem Display und reiner Kamerasicht gefunden werden.
H_{HD4} : Beim hybriden Display ist das Telepräsenzempfinden höher als bei der reinen Kamerasicht.	bestätigt	Die Versuchspersonen vergaben beim hybriden Display durchschnittlich einen Ratingpunkt mehr als bei der reinen Kamerasicht. Der Unterschied war signifikant.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Erweiterung des Gesichtsfeldes positive Effekte auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzerleben hat. Bei Telepräsenz- und Teleaktionssystemen sollte daher immer angestrebt werden, bei der visuellen Rückmeldung

von Informationen aus der entfernten Umgebung ein möglichst großes Gesichtsfeld abzudecken.

6.2. Variation der haptischen Informationen und deren Einfluss auf Aufgabenleistung und Telepräsenzempfinden

Die Fähigkeit des Benutzers, mehrere Freiheitsgrade bei der Manipulation ausführen und koordinieren zu können, hat eine lange Forschungstradition. Einige Studien zu diesem Thema entstanden bereits in den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Mit dem Aufkommen neuer Technologien wurde es zunehmend wichtiger, die Integration und Koordination mehrerer Freiheitsgrade durch den Menschen zu untersuchen.

Bewegungen im dreidimensionalen Raum können mittels sechs Freiheitsgrade beschrieben werden. Dazu gehören drei translatorische Freiheitsgrade, die die Koordinatenachsen darstellen, und die rotatorischen Freiheitsgrade, die die Rotation um diese drei Achsen kennzeichnen. Abbildung 6.03 zeigt diese sechs Dimensionen der Bewegung im dreidimensionalen Raum (es wird das mathematische Koordinatensystem zugrunde gelegt).

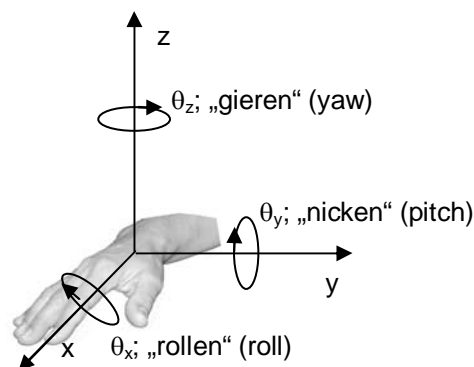


ABBILDUNG 6.03. Die drei translatorischen Dimensionen x , y und z sowie die drei rotatorischen Dimensionen θ_x , θ_y und θ_z bei dreidimensionalen Bewegungen.

Bei der Bewegungskoordination werden der Körper und die einzelnen motorischen Untergruppen so reguliert, dass möglichst wenige Freiheitsgrade bei der Bewegungsausführung resultieren und so koordinierte motorische Einheiten gebildet werden. Dieses Phänomen ist bekannt als das „degrees-of-freedom“-Problem (Bernstein, 1967; Turvey, Fitch & Tuller, 1982; Tuller, Fitch & Turvey, 1982; Fitch, Tuller & Turvey, 1982).

Frühe Studien kamen zu dem Ergebnis, dass die Fehler beim Bahntracking durch den Benutzer in einer Dimension immer auf Kosten einer anderen abnahmen (Ellson, 1947; Senders, Christensen & Sabeh, 1955; Gardner, 1950). Daraus wurde geschlossen, dass eine zielgerichtete Koordination mehrerer Freiheitsgrade nur eingeschränkt möglich ist.

Spätere Untersuchungen konnten jedoch zeigen, dass dieser Effekt der eingeschränkten Koordination hauptsächlich auf die technischen Restriktionen der verwendeten Eingabegeräte

zurückgeführt werden kann. Mit verbesserter Technologie ist die Bewegungskoordination in sechs Freiheitsgraden durchaus möglich, Benutzer können translatorische und rotatorische Bewegungen gleichzeitig kontrollieren und integrieren (Deml, 2004; Masliah & Milgram, 2000; Zhai & Senders, 1997a, 1997b).

Einige Studien konnten allerdings nachweisen, dass rotatorische Bewegungen häufig weniger effizient ausgeführt werden als translatorische Bewegungen (Zhai & Senders, 1997a, 1997b; Zhai & Milgram, 1998; Ware & Rose, 1999; für einen ausführlichen Überblick s. Deml, 2004). Die Effizienz hängt dabei nicht nur von der reinen Bewegungskoordination, sondern zusätzlich von der Aufgabe und dem Eingabegerät ab (z.B. Deml, 2004).

Als Gestaltungsgrundsatz geben Deml (2004) für Teleaktionsanwendungen sowie Zhai & Senders (1997a, 1997b) an, durch das Eingabegerät nur die Bewegungsdimensionen zu unterstützen, die auch für die Aufgabe benötigt werden.

Weiterhin wird empfohlen, dem Benutzer möglichst viele visuelle Tiefenhinweise zu geben, da diese auch zur Bewegungseffizienz vor allem um den Nickwinkel beitragen (Deml, 2004).

Alle genannten Studien beschäftigten sich mit der Bewegungskoordination. Bisher wurde jedoch noch nicht untersucht, inwiefern Benutzer bei telepräsenten manipulativen Aufgaben die rotatorischen Freiheitsgrade nutzen bzw. vermeiden. Da vom menschlichen Bewegungsapparat Translationen und Rotationen integriert und koordiniert werden können, ist vorstellbar, dass Drehbewegungen zum allgemeinen motorischen Repertoire gehören und daher intuitiv ausgeführt werden (s. z.B. Marken, 1991). Es ist allerdings auch denkbar, dass Rotationsbewegungen generell vermieden und nur dann ausgeführt werden, wenn die Aufgabe dies unbedingt erfordert, da rotatorische Bewegungen meist ineffizienter sind als translatorische.

Gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (LSR, Hauptverantwortliche: Angelika Peer) an der Technischen Universität München wurde untersucht, inwiefern Benutzer die ihnen zur Verfügung gestellten rotatorischen Freiheitsgrade nutzen. Es wurde eine telemanipulative Aufgabe generiert, die sowohl mit rein translatorischen Bewegungen als auch unter Zuhilfenahme der rotatorischen Freiheitsgrade gelöst werden konnte. Den Versuchspersonen wurden beim Eingabegerät drei, vier oder sechs Freiheitsgrade, die vom Handgelenk ausgeführt werden konnten, zur Verfügung gestellt. In der Bedingung mit den vier Freiheitsgraden wurde dabei nur die Rollbewegung um die x-Achse (θ_x in Abb. 6.03) freigeschaltet.

Auf der Benutzerseite kam das am LSR entwickelte haptische Ein-/Ausgabegerät VISHaRD10 (Virtual Scenario Haptic Rendering Device with 10 actuated DOF) zum Einsatz (Peer, 2005; Ueberle, Mock & Buss, 2007). Mit diesem Gerät ist es möglich, einen Teleoperator beidhändig zu steuern. Über den CyberGrasp der Firma Immersion Corporation wurde dem Benutzer Kraftrückmeldung gegeben. Der CyberGrasp ist ein exoskeletales Gerät, d.h. die vorliegenden Kräfte werden direkt auf die Knochenstruktur der Hand übertragen, wodurch der Benutzer den auftretenden Druck wahrnimmt. Visuell wurde dem Benutzer die Teleoperatorseite entweder über ein Head Mounted Display (HMD; NVIS nVisor SX, Auflösung 1280 x 1024) oder über eine Leinwand dargeboten. Diese beiden Bedingungen dienten als Gruppierungsfaktor bei dem Experiment. Bei der Bedingung mit dem HMD

wurden die Kopfbewegungen des Benutzers aufgezeichnet und die rotatorischen Kopfbewegungen wurden auf die Kameras des Teleoperators umgesetzt. Bei der Bedingung mit der Leinwand wurde das Bild über zwei Beamer projiziert, wobei sich die Blickwinkel in einem Augenabstand unterschieden. Durch das Tragen einer Shutter-Brille erhielten die Versuchspersonen somit einen dreidimensionalen Eindruck (Querdisparation bzw. binokulare Parallaxe, s. z.B. Tyler, 1983; Goldstein, 1996). Abbildung 6.04 zeigt die Benutzerseite mit der visuellen Darstellung über die Leinwand, die Kopplung der Hand mit dem CyberGrasp an VISHaRD10 sowie die Teleoperatorseite des verwendeten Telepräsenzsystems.

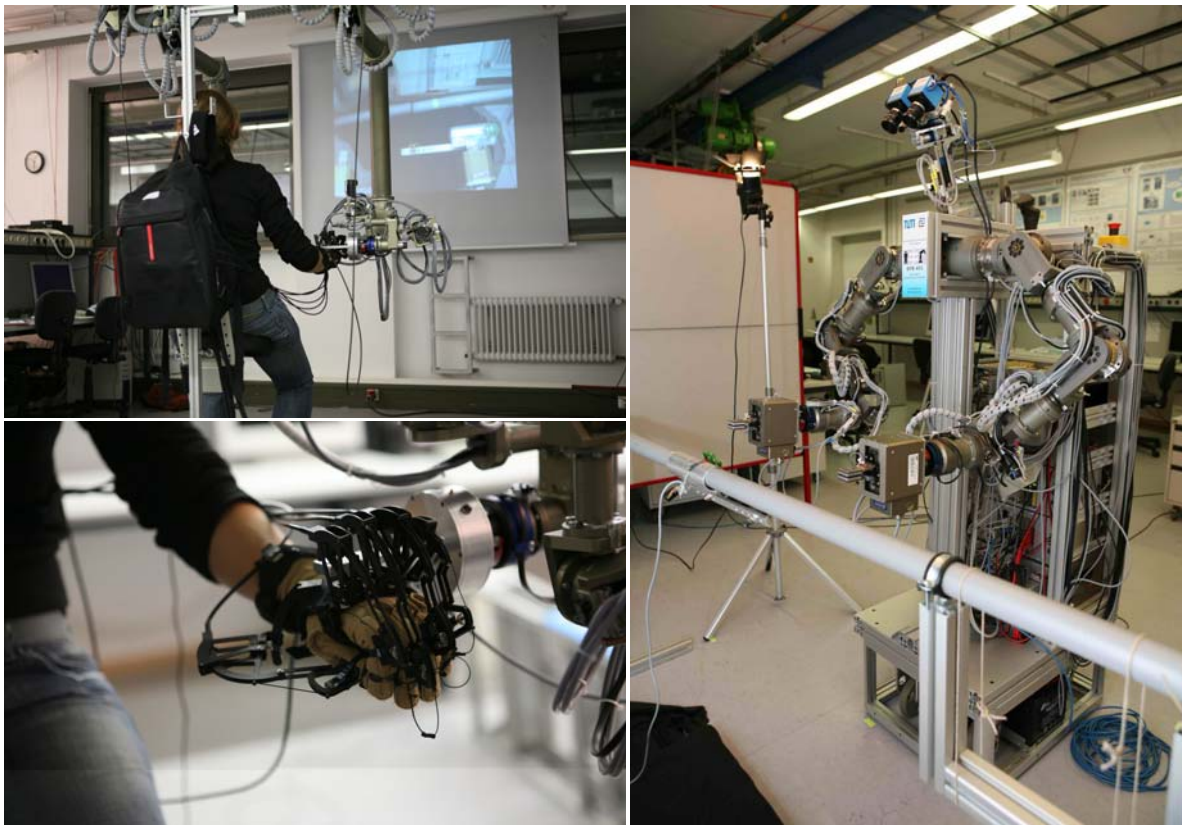


ABBILDUNG 6.04. Operator- (Master, links) und Teleoperator- (Slave, rechts) Seite des Telepräsenzsystems zur Untersuchung der Effekte variiertes haptischer Informationen.

Auf Grund der theoretischen Vorüberlegungen wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

H_{DOF1}: Die Effizienz der Aufgabenausführung ist höher, je weniger Freiheitsgrade dem Benutzer zur Verfügung stehen.

H_{DOF2}: Bei einer generellen Vermeidung von rotatorischen Bewegungen durch den Benutzer steigen diese bei der Verfügbarkeit von rotatorischen Freiheitsgraden nur geringfügig an. Werden Rotationsbewegungen dagegen intuitiv gebraucht, zeigt sich eine motorische Ausnutzung der zur Verfügung stehenden rotatorischen Freiheitsgrade.

H_{DOF3}: Bei einer Vermeidung von rotatorischen Bewegungen durch den Benutzer sinkt das Telepräsenzempfinden bei zur Verfügung stehenden rotatorischen Freiheitsgraden im Vergleich zu der Bedingung, in der nur translatorische Freiheitsgrade freigeschaltet sind. Bei einem intuitiven Gebrauch der rotatorischen Bewegungen steigt dagegen das Telepräsenzempfinden bei den Bedingungen mit den rotatorischen Freiheitsgraden an.

H_{DOF4}: Die Nutzung der rotatorischen Freiheitsgrade ist aufgabenabhängig.

H_{DOF5}: Die Nutzung der rotatorischen Freiheitsgrade hängt von den Vorerfahrungen des Benutzers ab.

H_{DOF6}: Die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden sind bei der visuellen Darstellung über das HMD höher als bei der Darstellung über die Leinwand, da mehr Tiefeninformationen zur Verfügung stehen.

Die Effizienz der Aufgabenausführung wurde operationalisiert als Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe in s, zurückgelegter Weg in m, Mittelwert und Maximum der ausgeübten Kraft des Benutzers in N sowie als Güterating zweier unabhängiger Versuchsleiter (Messung der Kräfte und Momente jeweils am Handgelenk).

Die Nutzung der rotatorischen Bewegungsmöglichkeit wurde als Mittelwert und Maximum des ausgeübten Moments durch den Benutzer in Nm, als Bereich der ausgeführten Drehwinkel in rad sowie als Bereich der genutzten Drehachsen in rad ermittelt. Zusätzlich wurde protokolliert, ob der Benutzer eine translatorische oder eine rotatorische Strategie bei der Aufgabenausführung übernahm.

Aufgabe und Versuchsdurchführung

Den Versuchspersonen wurden zunächst die CyberGrasps an beiden Händen angelegt. Nach der Kopplung an das System und eine Einweisung in die Bedienung des VISHaRD10 wurde den Probanden in der Bedingung mit der Leinwand als visuelle Rückmeldung der entfernten Umgebung eine Shutterbrille aufgesetzt. In der Bedingung mit dem HMD wurde ihnen dieses angelegt und der Augenabstand pro Person für eine dreidimensionale Sicht angepasst. Danach durchliefen die Probanden vier Übungsdurchgänge, in denen sie die ihnen gestellte Aufgabe ausführten. Als Gruppierungsfaktor diente bei den Übungsdurchgängen die Verfügbarkeit von drei, vier oder sechs Freiheitsgraden. Bei der Freischaltung von drei Freiheitsgraden standen nur die translatorischen Bewegungen zur Verfügung, bei vier Freiheitsgraden wurde zusätzlich die Drehung um die x-Achse („rollen“) eingestellt. Bei sechs Freiheitsgraden standen alle translatorischen und rotatorischen Dimensionen zur Verfügung. Diese Übungsbedingung wurde eingeführt, um die Vorerfahrung der Probanden mit rotatorischer Bewegungsmöglichkeit zu manipulieren.

Nach den vier Übungsläufen absolvierten die Versuchspersonen sechs experimentelle Durchgänge, in denen sie dieselbe Aufgabe wie bei der Übung zu bewerkstelligen hatten. Hier wurde den Versuchspersonen rosa Rauschen über geschlossene Kopfhörer präsentiert, so dass sie nicht durch Geräusche des VISHaRD10 bzw. des Teleoperators irritiert werden konnten. Jede Bedingung der Freischaltung der Freiheitsgrade kam dabei zwei Mal vor. Die Reihenfolge wurde sequentiell balanciert. Vor jedem experimentellen Durchgang sollten die

Versuchspersonen zunächst ausprobieren, welche Bewegungsmöglichkeiten (also wie viele Freiheitsgrade) ihnen zur Verfügung standen.



ABBILDUNG 6.05. In dem Experiment verwendete Schelle.

Als Aufgabe wurde die telemanipulative Reparatur eines Rohrbruchs nachgestellt. Zunächst bekamen die Probanden die in Abbildung 6.05 in senkrechter Orientierung dargestellte Schelle waagrecht in die rechte Hand bzw. in den rechten Greifer des Teleoperators gelegt, die Schelle musste dann gegriffen werden. Die auszuführende Aufgabe wurde in zwei Phasen unterteilt, um die Aufgabenabhängigkeit von rotatorischen Bewegungen zu untersuchen. In der ersten Phase sollten die Versuchspersonen die Schelle über die beiden gebrochenen Rohrenden schieben. Beide Rohrenden wurden zu Beginn jedes Durchgangs zueinander ausgerichtet und konnten bewegt werden.

In der zweiten Phase sollten die Probanden die Schelle zunächst an der Verlängerung am roten Knopf festhalten und danach die grüne Schraube mit einer Umdrehung zudrehen. Die LED am oberen Ende der Schelle leuchtete so lange, bis die Schraube um eine Umdrehung gedreht worden war. Nach jedem Durchgang, der aus beiden Aufgabenphasen bestand, wurde die Schraube durch den Versuchsleiter wieder an den Anfangspunkt zurückgedreht.

Die beiden Aufgabenphasen induzierten demnach unterschiedliche Grade an Rotationsbewegungen. Während bei der ersten Phase nur translatorische Bewegungen vonnöten waren, erschien es intuitiv, bei der zweiten Phase den vierten (rotatorischen) Freiheitsgrad zu nutzen, um die Schraube zuzudrehen. Diese konnte allerdings auch durch eine rein translatorische Bewegung, nämlich dem Schieben an den äußeren Rillen, zuge dreht werden. Weiterhin waren für die linke Hand nur translatorische Bewegungen erforderlich, wodurch eine weitere aufgabenabhängige Komponente realisiert wurde.

Für jede Phase wurde die benötigte Zeit durch einen Versuchsleiter gestoppt.

Nach jedem Durchgang wurden den Versuchspersonen drei Fragen zur Erfassung des Telepräsenzerlebens gestellt, die aus dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) entnommen wurden. Die drei Fragen lauteten:

- (1) Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr unnatürlich, 7 = sehr natürlich);

- (2) Wie gut konnten Sie Objekte in der entfernten Umgebung bewegen oder manipulieren? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr schlecht, 7 = sehr gut);
- (3) Wie stark fühlten Sie sich in die entfernte Umgebung hineinversetzt? (auf einer Skala von 1 bis 7; 1 = sehr wenig, 7 = sehr stark).

Zusätzlich wurde durch zwei Versuchsleiter unabhängig voneinander die Güte der Aufgabenausführung für jeden Durchgang auf einer Skala von 1 bis 10 (1 = sehr schlecht, 10 = sehr gut) bewertet.

Nach jedem Durchgang wurde sowohl die Operator- als auch die Teleoperatorseite neu initialisiert, so dass vor jeder Aufgabenausführung dieselbe Anfangsposition vom Gesamtsystem eingenommen wurde.

Den Versuchspersonen wurde zu keinem Zeitpunkt mitgeteilt, wie sie die Aufgabe zu bewältigen hatten. Sie mussten also ihre eigene Strategie für beide Aufgabenphasen generieren.

Nach Abschluss der Durchgänge füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen aus, der die demographischen Daten Alter, Geschlecht, Händigkeit, Grad der Erfahrung mit virtuellen Umgebungen oder Telepräsenzsystemen und verbrachte Stunden pro Monat mit Computerspielen mit 3D-Graphik enthielt. Zusätzlich erhielten sie den Fragebogen zur immersiven Tendenz als Persönlichkeitseigenschaft, der ebenfalls dem Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) entnommen wurde (elf Fragen).

Methode

a) Design

Die abhängigen Variablen für jeden Durchgang und jede Aufgabenphase waren als Maße für die Aufgabenleistung die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe, der zurückgelegte Weg, die durchschnittliche sowie die maximale aufgewendete Kraft und die beiden Güteratings der Versuchsleiter. Als Rotationsmaße wurden das durchschnittliche sowie das maximale aufgewendete Moment, der Bereich der ausgeführten Drehwinkel und der Bereich der genutzten Drehachsen herangezogen. Als Maße für das Telepräsenzerleben wurden die drei Telepräsenzfragen herangezogen. Zusätzlich wurde die generierte Strategie der Versuchspersonen für die Aufgabenerfüllung als abhängige Variable protokolliert.

Alle systemtechnisch aufgezeichneten Variablen wurden auf der Operatorseite gemessen.

Die unabhängigen Variablen in diesem Experiment waren die Übungsbedingung (3, 4 bzw. 6 Freiheitsgrade) und der Modus der visuellen Rückmeldung (Leinwand vs. HMD) als Gruppierungsfaktoren und die Anzahl der Freiheitsgrade (3, 4 oder 6), die Anzahl an Wiederholungen (zwei Stufen, da jeder Freiheitsgrad bei den experimentellen Durchgängen zwei Mal vorkam), die Hand (rechts vs. links) sowie die Aufgabenphase (Phase 1 und Phase 2) als Messwiederholungsfaktoren [3 x 2 x 3 x 2 x 2 x 2 – Design].

b) Stichprobe

16 Versuchspersonen im Alter zwischen 20 und 34 Jahren (Mittelwert 26.25 Jahre, Standardabweichung 3.96 Jahre) nahmen an dem Versuch teil. Acht der Probanden waren weiblich, acht männlich. Alle waren Rechtshänder. 15 von ihnen gaben an, keine bis mittlere Erfahrung mit virtuellen Umgebungen bzw. mit Telepräsenzsystemen zu haben, einer hatte

viel Erfahrung mit diesen Technologien. Die durchschnittliche Anzahl an verbrachten Stunden im Monat mit 3D-Computerspielen betrug 2.67 Stunden (Standardabweichung 5.54 Stunden, Bereich zwischen 0 und 20 Stunden).

Die immersive Tendenz belief sich im Durchschnitt über alle Versuchspersonen auf 4.35 (Standardabweichung 0.94, individuelle Mittelwerte zwischen 2.18 und 6.00).

Die Hälfte der Versuchspersonen erhielten die visuelle Rückmeldung über die Leinwand, die andere Hälfte über das HMD.

Sechs der Versuchspersonen hatten bei den Übungsdurchläufen Bewegungsmöglichkeiten in drei Freiheitsgraden, sechs Probanden in vier Freiheitsgraden und vier Probanden in sechs Freiheitsgraden.

Ergebnisse

Die Zeit für die Beendigung der Aufgabe in s wurde für die erste Aufgabenphase definiert als die Zeit ab dem Festhalten der Schelle bis zum Schieben der Schelle über beide Rohrenden zu einem vorher festgelegten Punkt (der grün auf dem rechten Rohrende markiert war). Die Zeit für die Beendigung der zweiten Phase wurde definiert ab dem Zeitpunkt, an dem der rote Knopf an der Verlängerung der Schelle gegriffen war bis zur Vollendung einer Drehung an der grünen Schraube, was mit dem Ausgehen der LED einher ging..

Die eingenommenen Positionen in m, die aufgewendeten Kräfte in N und Momente in Nm und Drehungen in rad in x-, y- und z-Richtung wurden mit einer Frequenz von 10 Hz aufgezeichnet.

Die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe wurde als Differenz zwischen Beginn und Fertigstellung der Aufgabenphase ermittelt.

Für die Berechnung des zurückgelegten Wegs wurden zunächst die Differenzen jeder Position zu ihrer vorhergehenden Position gebildet. Für jeden dieser Differenzvektoren wurde die Länge mittels euklidischer Norm berechnet. Diese Längen wurden für die jeweilige Phase summiert.

Für die Kraft- und Momentvektoren wurde jeweils die Länge durch die euklidische Norm ermittelt. Aus diesen einzelnen Werten wurden sowohl die durchschnittliche Länge als auch die Maxima berechnet.

Die Informationen über die Drehungen lagen als Quaternionen vor. Durch die Bildung des Arcuskosinus aus dem Realteil wurde der Drehwinkel ermittelt, durch Normierung des Imaginärteils die Drehachse. Für den Bereich der Rotationen wurden die Differenzen zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert gebildet.

Die Beurteilung der Güte sowie die benutzte Strategie bei der Aufgabenausführung wurden direkt den Notizen entnommen. Die Güteratings der beiden Versuchsleiter wurden gemittelt

Das Telepräsenzempfinden wurde über die Antworten der Versuchspersonen zu den drei Ratingfragen ermittelt.

Als Aufgabenleistungsmaße wurden die Kraft (Mittelwert und Maximum), der zurückgelegte Weg, die Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe und die Beurteilung der Güte verwendet.

Als Rotationsmaße dienten die Momente (Mittelwert und Maximum), der Drehwinkel und die normierte Drehachse.

Die Mittelwerte für die einzelnen abhängigen Variablen pro Faktor und Faktorstufe sind in Tabelle 6.02 dargestellt.

TABELLE 6.02. Mittelwerte der abhängigen Variablen pro Faktor und Faktorstufe.

Faktor	Stufe	Aufgabenleistungsmaße				
		Kraftdurchschnitt [N]	Kraftmaximum [N]	Weg [m]	Zeit [s]	Güteeinschätzung
Phase	1	2.19	9.63	0.84	53.36	7.70
	2	2.39	8.21	0.62	44.83	
Freiheitsgrade	3	2.73	9.71	0.75	45.25	7.67
	4	2.19	8.57	0.71	49.53	7.83
	6	1.93	8.48	0.73	52.52	7.60
Wiederholung	1	2.20	8.84	0.77	55.34	7.41
	2	2.38	9.00	0.69	42.85	8.00
Hand	rechts	2.34	9.15	0.96	49.10	7.70
	links	2.23	8.68	0.50		
Übungsbedingung (dof)	3	2.71	9.54	0.74	50.54	7.88
	4	2.09	8.76	0.73	49.29	7.19
	6	2.07	8.46	0.71	47.46	8.04
Visuelle Darstellung	Leinwand	2.75	10.30	0.83	50.16	7.09
	HMD	1.83	7.53	0.63	48.04	8.32
Gesamt		2.29	8.92	0.73	49.10	7.70

Faktor	Stufe	Rotationsmaße			Telepräsenzmaße			
		Momentdurchschnitt [Nm]	Momentmaximum [Nm]	Drehwinkel [rad]	Drehachse (normiert) [rad]	Rating 1 („Interaktion“)	Rating 2 („Bewegungskontrolle“)	Rating 3 („hineinversetzt“)
Phase	1	0.46	1.36	0.11	0.02	4.39	4.36	4.93
	2	0.47	1.16	0.16	0.05			
Freiheitsgrade	3	0.56	1.30	0.01	0.00	3.85	3.93	4.60
	4	0.58	1.53	0.18	0.04	4.54	4.53	5.10
	6	0.26	0.95	0.22	0.05	4.78	4.61	5.10
Wiederholung	1	0.46	1.28	0.14	0.03	4.25	4.19	4.89
	2	0.47	1.24	0.13	0.03	4.53	4.52	4.97
Hand	rechts	0.62	1.62	0.18	0.05	4.39	4.36	4.93
	links	0.32	0.89	0.08	0.02			
Übungsbedingung (dof)	3	0.48	1.16	0.12	0.02	5.06	4.64	5.39
	4	0.47	1.32	0.14	0.03	4.36	4.56	5.44
	6	0.45	1.30	0.15	0.04	3.75	3.88	3.96
Visuelle Darstellung	Leinwand	0.44	1.34	0.15	0.04	4.49	4.50	5.11
	HMD	0.49	1.18	0.12	0.03	4.29	4.21	4.75
Gesamt		0.47	1.26	0.13	0.03	4.39	4.36	4.93

Zwischen den demographischen Daten und den abhängigen Variablen ergaben sich keine signifikanten Korrelationen, die Ergebnisse sind somit unabhängig von Alter, Geschlecht, Erfahrung mit virtuellen bzw. telemanipulativen Umgebungen und verbrachter Stundenzahl mit 3D-Computerspielen der Probanden.

Die Telepräsenzratings korrelierten hoch miteinander, $r_{\text{Spearman}} = .773$, $p < .001$ zwischen Rating 1 („Natürlichkeit der Interaktion“) und Rating 2 („Bewegungskontrolle“); $r_{\text{Spearman}} = .740$, $p = .001$ zwischen Rating 1 und Rating 3 („hineinversetzt“) bzw. $r_{\text{Spearman}} = .790$, $p < .000$ zwischen Rating 2 und Rating 3. Die drei Telepräsenzratings sind demnach Teile desselben Konstrukts.

Bei den Kopfbewegungen im visuellen Darstellungsmodus mit dem HMD wurde eine maximale Auslenkung von 0.61 m (Standardabweichung 0.05 m) in x-Richtung (sagittal) und eine maximale Auslenkung von -0.005 (Standardabweichung 0.02 m) in y-Richtung (horizontal) aufgezeichnet.

Bei den Strategien zur Aufgabenbearbeitung bei der Phase 1 konnten zwei Hauptkategorien beobachtet werden. Die erste war eine einhändige Strategie. Das rechte Rohr wurde dabei mit der rechten Hand, die die Schelle hielt, nach hinten geschoben. Die Schelle wurde dann über das linke Rohr geschoben und gemeinsam mit dem Rohr zum rechten Rohrstück befördert, wo die Schelle mit der rechten Hand eingepasst wurde. Bei der zweiten Strategie wurden beide Hände eingesetzt. Mit der linken Hand wurde das linke Rohrstück hergeholt und die Schelle mit der rechten Hand über dieses Stück befördert. Anschließend wurde mit der rechten Hand das rechte Rohrstück positioniert und die Schelle mit der linken Hand über das rechte Rohrstück geschoben. Dabei wurde die Schelle entweder mit der Schraube waagrecht oder senkrecht zum Benutzer positioniert.

Beim Zudrehen der Schraube wurden ebenfalls zwei Strategien beobachtet. Eine Strategie bestand im Zudrehen der Schraube, wobei der rotatorische Freiheitsgrad um die x-Achse („rollen“) benutzt wurde. Diese Strategie kam nur zum Einsatz, wenn die Schelle senkrecht ausgerichtet wurde. Die andere Strategie bestand darin, die Schraube durch translatorische Bewegungen zuzuschieben, indem an den äußeren Rillen der Schraube geschoben wurde. Diese Strategie kam immer dann zum Einsatz, wenn dem Benutzer nur die drei translatorischen Freiheitsgrade zur Verfügung standen. Abbildung 6.06 zeigt die waagerechte sowie die senkrechte Ausrichtung der Schelle und bei letzterem die beiden Strategien für das Zudrehen der Schraube. Tabelle 6.03 gibt die Häufigkeit der Nutzung der jeweiligen Strategie pro Aufgabenphase über alle Versuchspersonen an. In zwölf der 15 Fälle, bei denen bei vier freigeschalteten Freiheitsgraden in der zweiten Aufgabenphase das translatorische Schieben verwendet wurde, wurde die Schelle waagrecht ausgerichtet, somit war ein rotatorisches Drehen nicht möglich. Bei sechs freigeschalteten Freiheitsgraden wurde in 14 der 17 Fälle die Schelle waagrecht ausgerichtet, so dass nur ein translatorisches Schieben der Schraube möglich war.



ABBILDUNG 6.06. Benutzte Strategien der Benutzer bei der Aufgabenausführung. Linkes Bild: waagerechte Ausrichtung der Schelle. Mittleres Bild: senkrechte Ausrichtung der Schelle, Zudrehen der Schraube durch Schieben. Rechtes Bild: senkrechte Ausrichtung der Schelle, Zudrehen der Schraube durch rotatorische Bewegung.

TABELLE 6.03. Häufigkeit der Nutzung der jeweiligen Strategien für die erste und zweite Aufgabenphase für die freigeschalteten Freiheitsgrade (dof) getrennt über alle Durchgänge.

		Freigeschaltete Freiheitsgrade		
		3 dof	4 dof	6 dof
Aufgabenphase 1	einhändig	15	12	14
	beidhändig	17	20	18
Aufgabenphase 2	Drehen (rotatorisch)	0	17	15
	Schieben (translatorisch)	32*	15	17

* hier war nur diese Strategie durch die Versuchsbedingung möglich.

Die zwei Strategien für jede Aufgabenphase wurden entsprechend kodiert und als zusätzliche abhängige Variablen in die nachstehenden Analysen aufgenommen.

Bezüglich der aufgestellten Hypothesen wurden folgende Effekte erwartet:

- bei einer höheren Effizienz bei weniger freigeschalteten Freiheitsgraden ein Haupteffekt des Faktors freigeschaltete Freiheitsgrade auf die Aufgabenleistungsmaße Kraft, Weg, Zeit und Beurteilung der Güte der Aufgabenausführung (H_{DOF1});
- bei intuitivem Gebrauch der rotatorischen Bewegungen ein Haupteffekt des Faktors freigeschalteten Freiheitsgrade auf die Rotationsmaße Moment, Drehwinkel, Drehachse und auf die Strategie. Falls Rotationen vermieden werden, wird kein Haupteffekt erwartet (H_{DOF2});
- bei intuitivem Gebrauch der rotatorischen Bewegungen ein Haupteffekt auf die Telepräsenzmaße, also auf die drei Ratingfragen. Falls Rotationen vermieden werden, wird kein solcher Haupteffekt erwartet (H_{DOF3});
- bei einer aufgabenabhängigen Nutzung von rotatorischen Bewegungen ein Haupteffekt der Aufgabenphase auf die Aufgabenleistung und auf die Rotationsmaße sowie ein Haupteffekt der Hand auf die Aufgabenleistung und auf die Rotationsmaße. Außerdem wurden Wechselwirkungen zwischen der Aufgabenphase und den freigeschalteten Freiheitsgraden, zwischen Hand und den freigeschalteten Freiheitsgraden sowie zwischen Aufgabenphase und Hand jeweils auf die Aufgabenleistungs- und Rotationsmaße erwartet. Diese Wechselwirkungen sollten auftreten, da die Kombinationen der Aufgabenphase, die der verschiedenen Tätigkeitsanforderungen an die rechte und die linke Hand sowie die der Freischaltung der verschiedenen Freiheitsgrade unterschiedliche Ausmaße an rotatorischen Bewegungen induzierten (H_{DOF4});
- bei einer Nutzung der Rotationsbewegung, die von der Vorerfahrung abhängig ist, ein Haupteffekt des Faktors Übungsbedingung auf die Rotationsmaße, auf die Aufgabenleistungsmaße sowie auf die verwendete Strategie. Ebenso wird ein Haupteffekt des Faktors Wiederholung auf die Rotationsmaße, die Aufgabenleistungsmaße sowie auf die verwendete Strategie erwartet. Weiterhin wurde eine Interaktion zwischen Aufgabenphase und Wiederholung auf die Rotationsmaße und auf die Strategie erwartet (H_{DOF5}). Die Übungsbedingung, also ob die Probanden mit 3, 4 oder 6 freigeschalteten Freiheitsgraden üben konnten, ist eine direkte Vorerfahrung. Bei der zweiten Wiederholung des jeweiligen Freiheitsgrades konnten die Probanden bereits mit jeder Bedingung Erfahrung machen, dies stellt somit eine indirekte Vorerfahrung dar. Ein eventueller Einfluss dieses Faktors sollte sich vor allem

in der zweiten Aufgabenphase, die die Rotation benötigte, verstärkt zeigen und zu einer Interaktion führen.

- bei einer Auswirkung der visuellen Darstellung ein Haupteffekt auf die Aufgabenleistungsmaße, die Rotationsmaße sowie das Telepräsenzempfinden (H_{DOF6}).

Für die Überprüfung der erwarteten Effekte wurde eine multivariate Kovarianzanalyse mit Messwiederholung mit den Gruppierungsfaktoren visuelle Darstellung (Leinwand vs. HMD) und Anzahl der Freiheitsgrade bei der Übung (3, 4, 6) und den Messwiederholungsfaktoren Aufgabenphase (Phase 1 vs. Phase 2), freigeschaltete Freiheitsgrade (3, 4 vs. 6), Wiederholung (2 Stufen) und Hand (rechts vs. links) und den oben genannten abhängigen Variablen berechnet. Als Kovariaten wurden die kürzesten Zeiten bei der Übung für Phase 1 und für Phase 2 mit in die Analyse eingeschlossen, da die Bearbeitungsgeschwindigkeit bei der Übung einen Einfluss auf die weitere Aufgabenbearbeitung haben könnte.

Da die Auswertungsergebnisse sehr umfangreich sind, werden die Resultate im Folgenden hypothesengeleitet berichtet. Für die Hypothesen H_{DOF1} bis H_{DOF3} werden Haupteffekte des Faktors freigeschaltete Freiheitsgrade erwartet. Diese werden in Tabelle 6.04 dargestellt.

TABELLE 6.04. Haupteffekte des Faktors freigeschaltete Freiheitsgrade.

Quelle		df	F	η^2	p
		innerhalb Vpn			
Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	2,20	10.01*	.500	.001
	Kraftmaximum	2,20	3.29	.248	.058
	Weg	2,20	0.14	.013	.875
	Zeit	2,20	0.79	.073	.467
	Beurteilung der Güte	2,20	0.58	.055	.568
Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	2,20	45.00*	.818	< .000
	Momentmaximum	2,20	28.26*	.739	< .000
	Drehwinkel	2,20	117.39*	.921	< .000
	Drehachse	2,20	43.52*	.813	< .000
Telepräsenzmaße	Telepräsenzrating 1	2,20	3.90*	.281	.037
	Telepräsenzrating 2	2,20	2.00	.167	.161
	Telepräsenzrating 3	2,20	3.65*	.267	.045
Strategie	Strategie	2,20	18.46 ^{a*}	.649	.001

^a: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

*: signifikant ($\alpha = 5\%$)

Bei den Aufgabenleistungsmaßen ist ersichtlich, dass die freigeschalteten Freiheitsgrade nur einen Effekt auf den Durchschnitt der aufgewendeten Kraft zeigten, nicht auf die anderen Maße für die Aufgabenleistung. Betrachtet man die deskriptiven Werte in Tabelle 6.02 für den Kraftdurchschnitt, so wird ersichtlich, dass mit zunehmenden Freiheitsgraden die Kraftaufwendung geringer wird. Erwartungsgemäß müsste dieser Effekt gegenteilig sein. Es konnte somit nicht bestätigt werden, dass die Effizienz mit weniger freigeschalteten Freiheitsgraden zunimmt, die Hypothese H_{DOF1} wird somit verworfen.

Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade zeigte einen signifikanten Effekt auf alle Rotationsmaße. Aus Tabelle 6.02 ergibt sich, dass sich die Momente zwischen 3 und 4 freigeschalteten Freiheitsgraden nicht sonderlich unterscheiden, jedoch bei 6 Freiheitsgraden abnehmen. Mit mehr Freiheitsgraden vergrößerten sich der Drehwinkel und

die Drehachse. Ebenso wurde die Strategie angeglichen, d.h. mit zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgraden wurden diese für die Drehung beim Schrauben genutzt. Daraus wird geschlossen, dass rotatorische Bewegungen nicht vermieden werden, sondern intuitiv ausgeführt werden, wenn dies möglich ist, womit die Hypothese H_{DOF2} beantwortet ist.

Im Vergleich der Zunahme von vier auf sechs Freiheitsgrade nahm der Drehwinkelbereich um 0.04 rad zu, dies entspricht einem zusätzlichen Drehwinkelbereich von 2.29°. Diese Zunahme kann als Maß für die Koordination betrachtet werden, da diese zusätzliche Drehung bei 6 Freiheitsgraden nicht notwendig ist, um die Schraube zuzudrehen. Da der Betrag der Zunahme verschwindend klein ist, kann die Kontrolle der 6 Freiheitsgrade als sehr koordiniert und integriert betrachtet werden. Ebenso zeigte sich nur eine sehr geringe Zunahme der normierten Drehachse von vier auf sechs freigeschaltete Freiheitsgrade.

Ebenso zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors freigeschaltete Freiheitsgrade auf zwei der drei Telepräsenzfragen. Mit der Verfügbarkeit der rotatorischen Freiheitsgrade empfanden die Probanden die Interaktion als natürlicher und konnten sich besser in die entfernte Umgebung hineinversetzen. Für die Frage, wie gut sie die Objekte bewegen oder manipulieren konnten, zeigte sich derselbe Trend, dieser wurde jedoch nicht signifikant. Da es mit 3 Freiheitsgraden auch möglich war, die Aufgabe zu vollenden und in der Frage nicht explizit nach den rotatorischen Bewegungen gefragt wurde, ist denkbar, dass die Versuchspersonen bei dieser Frage die generelle Aufgabenausführung und deren Machbarkeit bewertet haben und nicht die rotatorischen Freiheitsgrade. Die Hypothese H_{DOF3} kann insgesamt mit einem eher intuitiven Gebrauch der rotatorischen Freiheitsgrade mit positiver Auswirkung auf das Telepräsenzempfinden beantwortet werden.

Bezüglich der Hypothese H_{DOF4} (Aufgabenabhängigkeit der Benutzung von rotatorischen Bewegungen) wurden Haupteffekte der Faktoren Aufgabenphase und Hand sowie Zweifachinteraktionen zwischen freigeschalteten Freiheitsgraden, Aufgabenphase und Hand erwartet. Tabelle 6.05 gibt diese Ergebnisse wieder.

TABELLE 6.05. Haupteffekte der Faktoren Aufgabenphase und Hand sowie Zweifachinteraktionen zwischen freigeschalteten Freiheitsgraden, Aufgabenphase und Hand.

		Quelle	df	F	η^2	p
		innerhalb Vpn				
Aufgabenphase	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	1,10	0.94	.086	.356
		Kraftmaximum	1,10	8.37*	.456	.016
		Weg	1,10	9.93*	.498	.010
		Zeit	1,10	1.32	.116	.278
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	1,10	0.22	.021	.650
		Momentmaximum	1,10	11.74*	.540	.006
		Drehwinkel	1,10	2.49	.199	.146
		Drehachse	1,10	11.92*	.544	.006
	Strategie	Strategie	1,10	1.54	.133	.244
	Hand	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	1,10	0.10	.010
Kraftmaximum			1,10	1.27	.286	.113
Weg			1,10	257.43*	.963	< .000
Rotationsmaße		Momentdurchschnitt	1,10	39.46*	.798	< .000
		Momentmaximum	1,10	80.30*	.889	< .000
		Drehwinkel	1,10	21.49*	.682	.001
		Drehachse	1,10	14.13*	.586	.004
Aufgabenphase	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	1,10	7.44*	.427	.021

		Quelle	df	F	η^2	p	
x Hand		Kraftmaximum	1,10	14.43*	.591	.003	
		Weg	1,10	51.81*	.838	< .000	
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	1,10	1.41	.123	.263	
		Momentmaximum	1,10	5.96*	.373	.035	
		Drehwinkel	1,10	57.52*	.852	< .000	
	Drehachse	1,10	35.49*	.780	< .000		
Aufgabenphase x freigeschaltete Freiheitsgrade	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	2,20	5.10*	.338	.016	
		Kraftmaximum	2,20	0.57	.054	.577	
		Weg	2,20	2.78	.217	.086	
		Zeit	2,20	1.32	.116	.290	
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	2,20	1.32	.117	.288	
		Momentmaximum	2,20	2.48	.199	.109	
		Drehwinkel	2,20	2.00	.166	.162	
		Drehachse	2,20	8.60*	.462	.002	
	Strategie	Strategie	2,20	10.07*	.502	.001	
	Hand x freigeschaltete Freiheitsgrade	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	2,20	3.71*	.271	.043
			Kraftmaximum	2,20	5.03*	.335	.017
Weg			2,20	2.11	.606	.147	
Rotationsmaße		Momentdurchschnitt	2,20	15.36*	.707	< .000	
		Momentmaximum	2,20	24.12*	.175	< .000	
		Drehwinkel	2,20	17.32*	.634	< .000	
	Drehachse	2,20	12.48*	.555	< .000		

*: signifikant ($\alpha = 5\%$)

Die Aufgabenphase zeigte signifikante Effekte auf das Kraftmaximum und den zurückgelegten Weg. In der Phase 1, dem Platzieren der Schelle auf der Bruchstelle des Rohrs, wurden höhere Kräfte erreicht und längere Wege zurückgelegt. Dies scheint plausibel im Hinblick darauf, dass in der zweiten Phase hauptsächlich beim Festhalten der Schelle die Schraube zuge dreht wurde und daher weder die Kraftmaxima noch die Wege so lang waren wie in der ersten Phase. Weiterhin wurde ein signifikanter Effekt der Phase auf das Momentmaximum evident. Interessanter Weise ist dieses in der ersten Phase höher als in der zweiten Phase, die explizit Rotationen durch das Schrauben induzierte. Möglicher Weise kam der hohe Wert in der ersten Phase durch das Verkanten der Schelle an einem Rohrende beim Darüberschieben zustande, so dass hier höhere Momentmaxima auftraten. Der signifikante Effekt auf die Drehachse erscheint in der erwarteten Richtung, wonach in der zweiten Phase die Drehachse höher war als in der ersten Phase.

Der signifikante Effekt der Hand bezüglich des zurückgelegten Weges ist einleuchtend, da alle Versuchspersonen Rechtshänder waren und beide Aufgabenphasen hauptsächlich mit der rechten Hand bearbeitet haben. Ebenso einsichtig sind die signifikanten Effekte der Hand auf alle Rotationsmaße, deskriptiv sind diese höher bei der rechten Hand, was wiederum durch die Aufgabenausführung durch die dominante Hand zustande kommt.

Bei der Interaktion der Aufgabenphase mit der Hand zeigte sich, dass in der ersten Phase die Werte für die signifikanten abhängigen Variablen für beide Hände sehr ähnlich waren, jedoch in der zweiten Phase divergierten. Für die rechte Hand hatten in der zweiten Phase alle abhängigen Variablen einen höheren Wert als für die linke Hand. Dies ist wiederum mit der erforderlichen Bearbeitung der Aufgabe mit der rechten Hand zu erklären.

Die Wechselwirkung zwischen Aufgabenphase und freigeschalteten Freiheitsgraden für den Kraftdurchschnitt ergab, dass bei der zweiten Phase die Werte für vier und sechs zur

Verfügung stehenden Freiheitsgraden geringer waren als für drei Freiheitsgrade. In der ersten Phase waren die Werte hingegen sehr ähnlich. Die zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgrade führten also dazu, dass weniger Kraft aufgewendet wurde und die Rotation effektiv genutzt wurde, wenn die Aufgabe dies erforderte. Die signifikante Wechselwirkung für die Drehachse kommt dadurch zustande, dass bei drei freigeschalteten Freiheitsgraden die Drehachse über beide Phasen bei null bleibt, da hier keine Rotationen zur Verfügung standen. Die Drehachsen bei den zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgraden war in Phase 2 gegenüber Phase 1 erhöht. Dies spricht für die aufgabenabhängige Nutzung der rotatorischen Bewegungen. Ebenso wurde in der zweiten Phase bei vier und sechs freigeschalteten Freiheitsgraden überzufällig häufig die Strategie benutzt, die Schraube mittels Rotation zuzudrehen als diese über translatorische Bewegungen zuzuschieben.

Bei der Wechselwirkung zwischen Hand und freigeschalteten Freiheitsgraden ergab sich, dass die zur Verfügung stehenden rotatorischen Bewegungen vor allem von der rechten, dominanten Hand genutzt werden, mit der der Hauptteil der Aufgabenbearbeitung durchgeführt wurde.

Insgesamt konnte somit eine aufgabenabhängige Nutzung der rotatorischen Bewegungsoption und somit die Hypothese H_{DOF4} bestätigt werden.

Für die Hypothese H_{DOF5} , bei der postuliert wurde, dass die Nutzung der rotatorischen Bewegung von der Vorerfahrung abhängig ist, wurden Haupteffekte der Faktoren Übungsbedingung und Wiederholung sowie eine Wechselwirkung zwischen Aufgabenphase und Wiederholung erwartet. Die Ergebnisse für diese Effekte zeigt Tabelle 6.06.

TABELLE 6.06. Haupteffekte der Faktoren Übungsbedingung und Wiederholung sowie Wechselwirkung zwischen Aufgabenphase und Wiederholung.

		Quelle	df	F	η^2	p
zwischen Vpn						
Übungs- bedingung	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	2,10	1.33	.210	.308
		Kraftmaximum	2,10	0.52	.094	.610
		Weg	2,10	0.07	.014	.933
		Zeit	2,10	0.05	.009	.954
		Beurteilung der Güte	2,10	1.42	.221	.287
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	2,10	0.17	.033	.846
		Momentmaximum	2,10	1.31	.208	.312
		Drehwinkel	2,10	1.07	.176	.380
		Drehachse	2,10	1.58	.240	.253
	Telepräsenzmaße	Telepräsenzrating 1	2,10	2.62	.344	.122
		Telepräsenzrating 2	2,10	1.43	.222	.285
		Telepräsenzrating 3	2,10	2.68	.349	.117
	Strategie	Strategie	2,10	0.08	.015	.927
	innerhalb Vpn					
Wiederholung	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	1,10	2.36	.191	.156
		Kraftmaximum	1,10	0.12	.012	.735
		Weg	1,10	3.28	.247	.100
		Zeit	1,10	10.61*	.515	.009
		Beurteilung der Güte	1,10	12.89*	.563	.005
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	1,10	1.36	.119	.271
		Momentmaximum	1,10	0.47	.045	.507
		Drehwinkel	1,10	0.43	.041	.526
		Drehachse	1,10	0.36	.035	.561
	Telepräsenzmaße	Telepräsenzrating 1	1,10	1.06	.096	.327

		Quelle	df	F	η^2	p	
		Telepräsenzrating 2	1,10	1.69	.144	.223	
		Telepräsenzrating 3	1,10	0.21	.020	.659	
Strategie		Strategie	1,10	0.88	.081	.371	
Aufgabenphase x Wiederholung	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	1,10	0.01	.001	.908	
		Kraftmaximum	1,10	0.97	.088	.348	
		Weg	1,10	0.04	.004	.844	
		Zeit	1,10	0.46	.044	.515	
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	1,10	0.38	.037	.552	
		Momentmaximum	1,10	3.17	.241	.105	
		Drehwinkel	1,10	0.69	.063	.433	
		Drehachse	1,10	1.03	.094	.334	
	Strategie		Strategie	1,10	6.49*	.394	.029

*: signifikant ($\alpha = 5\%$)

Die Übungsbedingung zeigte auf keine der abhängigen Variablen einen Effekt, diese spielte somit als Indikator für die Vorerfahrung mit rotatorischen Bewegungen keinerlei Rolle für die spätere Aufgabenbearbeitung. Die Wiederholung zeigte nur signifikante Effekte auf die Zeit für die Aufgabenbearbeitung und die Beurteilung der Güte. Diese Zusammenhänge sind trivial und auf Übungseffekte durch eine höhere Anzahl an Durchgängen zurückzuführen. Die Interaktion zwischen Aufgabenphase und Wiederholung wurde nur signifikant für die Strategie und kam dadurch zustande, dass bei der zweiten Wiederholung häufiger die Drehstrategie als die Schiebenstrategie bei der Schraube als bei der ersten Ausführung benutzt wurde. Dies spricht eher für einen Effekt der zur Verfügung gestellten Rotationen, die mit zunehmender Anzahl an Durchgängen verstärkt genutzt wurden.

Insgesamt ist die Vorerfahrung mit rotatorischen Bewegungen nicht aussagekräftig für die spätere Nutzung der Rotationen, diese werden intuitiv ausgeführt. Die Hypothese H_{DOR5} wurde somit nicht bestätigt.

Bezüglich der Erwartungen der visuellen Darstellungsmodi in Hypothese H_{DOR6} wurden die Haupteffekte des Faktors Darstellung betrachtet. Diese sind in Tabelle 6.07 aufgeführt.

TABELLE 6.07. Haupteffekte des Faktors visuelle Darstellung (Leinwand vs. HMD).

		Quelle	df	F	η^2	p	
		zwischen Vpn					
Darstellung	Aufgabenleistungsmaße	Kraftdurchschnitt	1,10	5.86*	.370	.036	
		Kraftmaximum	1,10	9.30*	.482	.012	
		Weg	1,10	10.89*	.521	.008	
		Zeit	1,10	0.07	.007	.795	
		Beurteilung der Güte	1,10	7.56*	.430	.021	
	Rotationsmaße	Momentdurchschnitt	1,10	1.86	.156	.203	
		Momentmaximum	1,10	2.89	.224	.120	
		Drehwinkel	1,10	2.27	.185	.163	
		Drehachse	1,10	1.00	.091	.342	
	Telepräsenzmaße	Telepräsenzrating 1	1,10	0.20	.020	.065	
		Telepräsenzrating 2	1,10	0.57	.054	.467	
		Telepräsenzrating 3	1,10	0.42	.040	.531	
	Strategie		Strategie	1,10	4.82	.325	.053

Die Darstellung über das HMD hatte positive Effekte auf die Aufgabenleistung. Die auftretenden Kräfte sowie die Kraftmaxima waren geringer als in der Bedingung mit der Darstellung auf der Leinwand. Ebenso waren die zurückgelegten Wege kürzer und die Beurteilung der Güte durch die Versuchsleiter fiel höher aus. Jedoch zeigten sich keine Effekte auf das Telepräsenzempfinden. Der bessere visuelle Tiefeneindruck durch das HMD wirkt sich demnach hauptsächlich auf die Aufgabenleistung aus, die Hypothese H_{DOF6} konnte nur teilweise bestätigt werden.

Die sonstigen, hier nicht betrachteten Haupteffekte und Wechselwirkungen zeigten keine signifikanten Effekte auf die abhängigen Variablen, ebenso wenig die beiden Kovariaten (minimale Übungszeit bis zur Beendigung der Aufgabe für jede Aufgabenphase).

Tabelle 6.08 fasst die Bestätigung der hier aufgestellten Hypothesen zusammen.

TABELLE 6.08. Übersicht über die aufgestellten Hypothesen zu Effekten variiertes haptischer Rückmeldung und deren Bestätigung.

Hypothesen		Erläuterung
H_{DOF1} : Die Effizienz der Aufgabenausführung ist höher, je weniger Freiheitsgrade dem Benutzer zur Verfügung stehen.	nicht bestätigt	Die Effizienz der Aufgabenausführung nahm mit zunehmenden Freiheitsgraden zu.
H_{DOF2} : Bei einer Vermeidung von rotatorischen Bewegungen vom Benutzer werden Rotationen nicht genutzt. Bei einer intuitiven Verwendung werden rotatorische Bewegungen häufiger bei ihrer Verfügbarkeit ausgeführt.	beantwortet	Rotatorische Bewegungen werden vom Benutzer intuitiv eingesetzt und ausgeführt, zudem verbessert sich im Vergleich zu der Verfügbarkeit rein translatorischer Freiheitsgrade die Aufgabenleistung.
H_{DOF3} : H_{DOF2} gilt ebenfalls für das Präsenzerleben.	beantwortet	Bei der Verfügbarkeit von rotatorischen Freiheitsgraden war das Telepräsenzempfinden besser als ohne Möglichkeit von Rotationsbewegungen.
H_{DOF4} : Die Nutzung der rotatorischen Freiheitsgrade ist aufgabenabhängig.	bestätigt	Die Nutzung der Rotationen hing ab von der Aufgabenphase, die ein unterschiedliches Ausmaß an Rotationsbewegungen induzierte, von der benutzten Hand und von den Kombinationen aus freigeschalteten Freiheitsgraden, Aufgabenphase und Hand.
H_{DOF5} : Die Nutzung der rotatorischen Freiheitsgrade ist abhängig von den Vorerfahrungen.	nicht bestätigt	Die rotatorischen Freiheitsgrade wurden intuitiv unabhängig von der Vorerfahrung der Probanden genutzt.
H_{DOF6} : Die visuelle Darstellung der entfernten Umgebung über ein HMD verbessert die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden gegenüber der Darstellung über eine Leinwand.	teilweise bestätigt	Die visuelle Darstellung über ein HMD verbesserte die Aufgabenleistung, nicht jedoch das Telepräsenzempfinden.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass Rotationen von den Benutzern sehr koordiniert und integriert benutzt wurden. Es wurden insgesamt nur positive Effekte bei der Freischaltung der zusätzlichen rotatorischen Freiheitsgrade aufgedeckt. Zudem wurden diese von den Versuchspersonen intuitiv genutzt und den Aufgabenerfordernissen entsprechend eingesetzt.

Bei sehr gut geregelten und intuitiv bedienbaren haptischen Ein-/Ausgabegeräten wie dem VISHaRD10, bei dem auch die Bedienung für rotatorische Bewegungen anthropomorph gestaltet ist, sollten dem Benutzer möglichst alle sechs Freiheitsgrade zur Verfügung gestellt werden, um sowohl die Aufgabenleistung als auch das Telepräsenzempfinden zu maximieren.

6.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden exemplarisch zwei Studien vorgestellt, bei denen die Rückmeldung aus der entfernten Umgebung bei Telepräsenzsystemen variiert wurde.

Die erste Untersuchung beschäftigte sich mit der visuellen Wahrnehmung, insbesondere mit der Auswirkung eines erweiterten Gesichtsfeldes bei der Rückmeldung einer entfernten Szene über ein Head Mounted Display. Es konnte gezeigt werden, dass ein erweitertes Gesichtsfeld positive Auswirkungen auf die Aufgabenleistung und das Telepräsenzempfinden hat. Insbesondere bei langsamen Kamerabewegungen war die Erweiterung des reinen Kamerabildes um ein photorealisiertes virtuelles Modell von Vorteil, da anstatt der schwarzen Darstellung von nicht sichtbaren bzw. von der Kamera noch nicht erfassten Szenenteilen durch das virtuelle Modell dargestellt wurden. Bei der Rückmeldung von visuellen Informationen aus einer entfernten Umgebung mit einem Head Mounted Display sollten solche Irritationen vermieden und es sollte angestrebt werden, ein möglichst großes Gesichtsfeld abzudecken.

Bei der zweiten Untersuchung wurde als Schwerpunkt die haptische Wahrnehmung betrachtet. Die entfernte Umgebung konnte hier entweder nur translatorisch oder mit Zuschaltung rotatorischer Freiheitsgrade manipuliert werden. Es konnte dargestellt werden, dass Benutzer die rotatorischen Freiheitsgrade sehr gut integrieren und koordinieren konnten. Die Effizienz der Aufgabenbearbeitung war höher mit der Möglichkeit der rotatorischen Bewegung, ebenso das Telepräsenzempfinden. Weiterhin setzten die Benutzer die Rotationen intuitiv und aufgabenbezogen ein, was nicht von der Vorerfahrung der Benutzer abhing. Die Befunde in der Literatur, wonach rotatorische Bewegungen häufig ineffizienter ausgeführt werden als translatorische Bewegungen, scheint ein Artefakt der früheren haptischen Ein-/Ausgabegeräte zu sein, da hier diese negativen Effekte mit einem hoch optimierten Gerät nicht auftraten.

7. Zusammenfassung und Diskussion der in dieser Arbeit aufgefundenen Ergebnisse

Bei virtuellen und Telepräsenzsystemen können vier distinkte Komponenten unterschieden werden:

- (1) der menschliche Benutzer bzw. Operator, der über
- (2) Ein-/Ausgabegeräte
- (3) eine ausführende Einheit, den Teleoperator, kommandiert. Dieser befindet sich in einer virtuellen oder physikalisch entfernten Umgebung. Die Daten zwischen Operator und Teleoperator werden ausgetauscht über einen
- (4) Kommunikationskanal. Da zum Teil große Datenmengen vom Operator zum Teleoperator (Befehle an den Teleoperator) und wieder zurück (Informationen aus der vermittelten Umgebung) transferiert werden müssen, ist es notwendig, die Daten zu komprimieren. Zudem treten Probleme bei der Signalübertragung wie beispielsweise Zeitverzögerungen oder Verzerrungen der Daten auf.

Bei virtuellen Systemen werden der Kommunikationskanal und die ausführende Einheit von einem Computer simuliert (für eine schematische Darstellung eines Telepräsenzsystems s. Abb. 1.01).

Jede dieser vier Komponenten kann einen Einfluss auf die Aufgabenleistung des Operators bei einer virtuellen oder telemanipulativen Aufgabe und auf das Präsenzepfinden des Operators ausüben.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit wurde nach Sichtung der einschlägigen Literaturstellen das Präsenzepfinden als ein kognitiver Zustand definiert, genauer als ein spezieller Aufmerksamkeitszustand, bei dem die Aufmerksamkeitsressourcen des Benutzers hauptsächlich auf die vermittelte Umgebung gerichtet sind. Je mehr Ressourcen durch die Vermittlung bzw. durch die aktuelle Umgebung abgezogen werden, desto geringer ist das Präsenzepfinden.

Die Ergebnisse empirischer Untersuchungen konnten zeigen, dass das Präsenzepfinden vor allem durch affektive, motivationale und perzeptuelle Prozesse, nicht jedoch durch kognitive, motorische oder interaktive Komponenten beeinflusst wird. Für den Zusammenhang zwischen Aufgabenleistung und Präsenzepfinden wurden sehr inkonsistente Ergebnisse vorgefunden. Die Resultate deuten eher darauf hin, dass die beiden Konstrukte unabhängig voneinander sind und deren Zusammenhang durch Drittvariablen bzw. gemeinsam geteilte Prozesse vermittelt wird. Während das Präsenzepfinden bestimmt wird durch den Anteil der Aufmerksamkeitsprozesse, die auf die vermittelte Umgebung gerichtet sind, an den Gesamtressourcen, wird die Aufgabenleistung durch die Aufmerksamkeitsprozesse, die auf die Aufgabe gerichtet sind, herbeigeführt. Dies sollte bei der jeweiligen Telepräsenzanzwendung Berücksichtigung finden. Besteht das Ziel darin, ein möglichst hohes Präsenzepfinden zu erreichen, sollte die vermittelte Umgebung so interessant und wirklichkeitstreu gestaltet werden, dass der Aufmerksamkeitsfokus des Benutzers in der vermittelten Umgebung bleibt. Bei Telepräsenzanzwendungen, bei denen die Aufgabenleistung im Vordergrund steht, sollte die Aufgabe so interessant und nicht zu komplex gehalten sein, so dass die Aufmerksamkeitsressourcen des Benutzers hauptsächlich

auf der Aufgabe liegen. Dabei sollten die Ein-/Ausgabegeräte so beschaffen sein, dass diese intuitiv gebraucht werden können. Störungen aus der aktuellen Umgebung sind in jedem der beiden Prioritätsfälle zu vermeiden.

Im Kapitel 1 dieser Arbeit wurde eine Reihe von übergeordneten Fragen gestellt, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollten.

Die erste Frage beschäftigte sich mit der Einstellung der Kommunikationsparameter und die Auswirkungen dieser Einstellung auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung sowie mit den Effekten von Übertragungsproblemen. Die erste Teilfrage widmete sich der Einstellung und lautete:

(1A) Wie sollen – ausgehend von der menschlichen Wahrnehmung – die Parameter des Kommunikationskanals eingestellt werden, so dass die Rückmeldung von Informationen aus der vermittelten Umgebung für den Benutzer verständlich und interpretierbar sind?

Als Schwerpunkt wurde hier die Einstellung von haptischen Daten behandelt, da für visuelle und auditive Signale bereits bewährte Standards vorhanden sind. Ein innovativer Ansatz bei haptischen Daten stellt die wahrnehmungsbasierte Einstellung der Kommunikationsparameter dar, wie dies auch bei auditiven Signalen vorgenommen wird, d.h. dass Signale und Signalunterschiede, die vom Menschen nicht wahrgenommen werden können, nicht dargestellt werden und Signalunterschiede, die sehr gut wahrgenommen werden können, auch sehr gut aufgelöst kodiert werden.

Bei der wahrnehmungsbasierten Kodierung von Informationen gibt es direkte Entsprechungen zwischen Wahrnehmungseigenschaften und Akquisitionsparametern für verschiedene Signale (s. Kap. 3):

Obere Wahrnehmungsschwelle (Absolutschwelle)	→ Abtastfrequenz
Ebenmerkliche Unterschiede	→ Quantisierungsintervall
Entwicklung des ebenmerklichen Unterschieds nahe der Absolutschwelle	→ Quantisierungsart
Wahrnehmungsrelevante Dimension bei Daten, die aus verschiedenen Einzelsignalen zusammengesetzt sind	→ Kodierung der wahrnehmungsrelevanten Informationen

Für die Übertragung von haptischen Daten wurde aus dem propriozeptiven Bereich die Wahrnehmung und Einstellung von Kraft- und Richtungsdaten (Kap. 4.1.), aus dem taktilen Bereich die Wahrnehmung und Einstellung von vibrotaktilen Daten (Kap. 4.2.) ausgewählt. Tabelle 7.01 stellt die Ergebnisse im Hinblick auf die Akquisitionsparameter im Kommunikationskanal und deren Einstellung für die in dieser Arbeit aufgefundenen Ergebnisse für Kraft- und Richtungsdaten sowie für vibrotaktile Daten dar.

TABELLE 7.01. Zusammengefasste Darstellung der Ergebnisse für die Einstellung der Akquisitionsparameter im Kommunikationskanal für Kraft- und Richtungsdaten und für vibrotaktile Daten.

Kraft- und Richtungsdaten (Kap. 4.1.)	
Abtastfrequenz	Da Kraftdaten von den Mechanorezeptoren in der Skelettmuskulatur im Bereich von 0 bis 30 Hz wahrgenommen werden (s. Abb. 4.01), ist eine Abtastfrequenz von etwa 60 Hz (Nyquist-Theorem) für die Darstellung von Kraftsignalen ausreichend. Jedoch müssen hier auch Systemanforderungen berücksichtigt werden. Die Abtastfrequenz sollte insbesondere so gewählt werden, dass keine Instabilitäten auftreten, da diese vom Benutzer wahrgenommen werden können und als störend empfunden werden (Kap. 4.1.3.).
Quantisierungsintervall	Der ebenmerkliche Unterschied für Kraft bei Konstanthaltung der Richtung betrug 12% für die sagittale Richtung und erhöhte sich bis 32% für die horizontale und vertikale Richtung. Bei einem Zeitintervall von 500 ms zwischen zwei Kraftbeträgen erhöhte sich die Sensitivität, d.h. der ebenmerkliche Unterschied nahm ab. Eine abnehmende Sensitivität bis zu 38% wurde ebenfalls für einen Kraftbetrag von 1.0 N im Vergleich zu 1.5 und 2.0 N gefunden (Kap. 4.1.4.1.). Der ebenmerkliche Unterschied für Richtung bewegte sich zwischen 8% für die sagittale und 24% für die horizontale und vertikale Richtung. Es zeigte sich eine abnehmende Sensitivität bis 38% für 1.0 N im Vergleich zu 1.5 und 2.0 N. Das Interstimulusintervall hatte hier keine Auswirkung (Kap. 4.1.4.2.).
Quantisierungsart	Bei einem Kraftbetrag von 1.0 N und Konstanthaltung der Richtung und bei dem Interstimulusintervall von 500 ms zeigte sich die höchste Sensitivität, also der kleinste ebenmerkliche Unterschied von 31%, für die horizontalen und vertikalen Richtungen im Vergleich zu der sagittalen Ebene, hier war der ebenmerkliche Unterschied 38%. Bei kleineren Kräften von 0.5 und 0.75 N nahmen die ebenmerklichen Unterschiede auf bis zu 40% zu (Kap. 4.1.5.).
Kodierung	Bei der gleichzeitigen Variation von Kraft und Richtung bei einem Interstimulusintervall von 500 ms zeigten sich bei der Vorgabe von zwei distinkten Kraftbeträgen ebenmerkliche Unterschiede von 11% für die sagittale Richtung bis 22% für die horizontalen und vertikalen Richtungen. Für den Kraftbetrag von 1.0 N nahm die Sensitivität auf bis zu 27% im Vergleich zu 1.5 und 2.0 N ab. Die dominante Wahrnehmungsdimension war bei dieser Vorgabe die Kraft (Kap. 4.1.6.1.). Bei der gleichzeitigen Vorgabe von Kraft und Richtung mittels Vektoraddition ergab sich für den ebenmerklichen Unterschied eine Isotropie für alle Richtungen. Für die Kraftbeträge von 1.5, 2.0 und 2.5 N war der ebenmerkliche Unterschied 17%; für 1.0 N 23%. Es konnte keine dominante Wahrnehmungsdimension gefunden werden, hier scheint eine andere Wahrnehmungskodierung vorzuherrschen als bei der Vorgabe zweier distinkter Vektoren (Kap. 4.1.6.2.).
Vibrotaktile Daten (Kap. 4.2.)	
Abtastfrequenz	Als obere Absolutschwelle von Frequenzen wurde der Bereich von 1000 bis 1400 Hz ermittelt (Kap. 4.2.3.1.). Bei der Interpretierbarkeit von Texturen mittels Frequenzen konnte gezeigt werden, dass Makrotexturen nicht allein durch die temporale Frequenz kodiert werden können, hier ist die zusätzliche räumliche Information notwendig. Zudem wurden die Frequenzen systematisch überschätzt. Bei Mikrotexturen konnte eine temporale Strategie von den Probanden erfolgreicher eingesetzt werden. Für die Wahrnehmung von Mikrotexturen sollte ein Frequenzbereich von etwa 500 Hz dargestellt werden (Abtastfrequenz etwa 1000 Hz), jedoch ist dies auch aufgabenabhängig (Kap. 4.2.3.2.).
Quantisierungsintervall	Bei Vibrationen mit Frequenzen über 100 Hz ergab sich ein ebenmerklicher Unterschied von 19%. Dieser war unabhängig vom Ausgabegerät und war bis zu dem Bereich von 700 Hz konstant (Kap. 4.2.4.).
Quantisierungsart	Bei Vibrationen mit Frequenzen im Bereich von 40 bis 80 Hz zeigten sich abnehmende ebenmerkliche Unterschiede zwischen 5 und 8%, in diesem Frequenzbereich herrscht demnach eine höhere Sensitivität vor (Kap. 4.2.5.).
Kodierung	Vibrationen wurden hauptsächlich durch ihre Frequenz und Amplitude, nicht jedoch durch die Beschleunigung kodiert. Als dominante Wahrnehmungsdimension sollte vor allem die Frequenz beachtet werden (Kap. 4.2.6.).

Die zweite Teilfrage zu der Einstellung und der Auswirkung von Kommunikationsparametern beschäftigte sich mit der Auswirkung der Einstellung der Akquisitionsparameter auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden:

(1B) Wie wirkt sich die so vorgenommene Einstellung der Kommunikationsparameter auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung aus?

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden die gefundenen ebenmerklichen Unterschiede für Kraft- und Richtungsdaten und für vibrotaktile Daten als Quantisierungsintervalle implementiert. Diese Intervalle wurden innerhalb und außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds variiert und deren Auswirkung auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden untersucht. Bei den Kraft- und Richtungsdaten wurde zusätzlich die visuelle Rückmeldung variiert. Die folgende Tabelle 7.02 stellt die Ergebnisse zusammen.

TABELLE 7.02. Ergebnisse für die Auswirkungen der Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten sowie von vibrotaktile Daten auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden.

Untersuchter Parameter	Effekte der haptischen Quantisierung auf die Aufgabenleistung	Effekte der haptischen Quantisierung auf das Präsenzepfinden	Kompensationseffekte von haptischer und visueller Quantisierung
Kraft- und Richtungsdaten (Kap. 4.1.7.)	Es ergaben sich keine Effekte auf die Aufgabenleistung.	Mit zunehmend größerer Quantisierung nahm das Präsenzepfinden ab. Dieser Effekt trat allerdings erst bei viel größeren Unterschieden als dem ebenmerklichen Unterschied auf.	Eine schlechte Quantisierung in einer Modalität konnte durch eine gute Darstellung der anderen Modalität kompensiert werden.
Vibrotaktile Daten (Kap. 4.2.7.)	Die Aufgabenleistung änderte sich nicht bei Differenzen innerhalb des ebenmerklichen Unterschieds. Für Differenzen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds nahm die Aufgabenleistung ab.	Es zeigten sich keine Effekte auf das Präsenzepfinden.	

Es ergaben sich demnach unterschiedliche Befunde für Kraft- und Richtungsdaten im Vergleich zu vibrotaktile Daten. Während die haptische Quantisierung von Kraft- und Richtungsdaten keine Effekte auf die Aufgabenleistung, dafür aber Effekte auf das Präsenzepfinden zeigte, war dies bei den vibrotaktile Daten genau umgekehrt. Da bei den beiden Datenarten auch verschiedene Aufgaben verwendet wurden, ist durchaus möglich, dass der jeweilige Zusammenhang aufgabenabhängig ist. Jedoch kann auch bei anderen Datenarten (z.B. Nachgiebigkeit, Kantenwahrnehmung, s. Freyberger, 2008) davon ausgegangen werden, dass eine Darstellung der Differenzen außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds eine Auswirkung entweder auf das Präsenzepfinden, auf die Aufgabenleistung oder auf beide Entitäten hat, daher sollte die Rückmeldung von Unterschieden stets im Bereich unterhalb des ebenmerklichen Unterschieds gehalten werden.

Die dritte Teilfrage zu dem Einfluss von Kommunikationsvariablen beschäftigte sich mit den Übertragungsparametern:

- (1C) Wie wirken sich die Kompression von Daten und Probleme bei der Datenübertragung wie Zeitverzögerung auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung aus?

Bei der Kompression von haptischen Daten wurde der Deadband-Ansatz verwendet. Dabei wurden die Daten wahrnehmungsbasiert nach den in dieser Arbeit gefundenen Unterschiedsschwellen für Kraft- und Richtungsdaten komprimiert. Hier zeigte sich, dass bei Kompressionsraten, bei denen Daten unterhalb des ebenmerklichen Unterschieds für Kraft und Richtung nicht berücksichtigt wurden, weder die Aufgabenleistung noch das Präsenzepfinden beeinträchtigt wurden. Kompressionsstufen hingegen, die auch Daten nicht berücksichtigten, die außerhalb des ebenmerklichen Unterschieds lagen, führten zu einem verminderten Präsenzepfinden und zu geringeren Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei der gestellten Aufgabe.

Bei einer Kompressionsrate unterhalb des ebenmerklichen Unterschieds konnten die Paketraten für Kraft- und Geschwindigkeitssignale bereits beträchtlich verringert werden.

Bei Zeitverzögerungen im Kommunikationskanal zeigte sich, dass die Aufgabenleistung ab 200 ms, das Präsenzepfinden ab 150 ms einbrachen, wobei die Latenzen schon früher wahrgenommen wurden. Die Abnahmen in der Aufgabenleistung und im Präsenzerleben folgten jeweils einer quadratischen Funktion. Variable Zeitverzögerungen zeigten stärkere negative Auswirkungen als konstante Zeitverzögerungen. Bei letzteren waren Kontaktaufgaben mehr betroffen als Bewegungen im freien Raum. Dabei konnten die negativen Effekte gemindert werden durch die zusätzliche Implementierung von Dämpfung bzw. Nachgiebigkeit, nicht jedoch durch die Einführung zusätzlicher Trägheit in das System.

Insgesamt konnten die Versuchspersonen Zeitverzögerungen sehr schlecht einschätzen, es fand eine systematische Überschätzung der vorhandenen Latenzen statt.

Ein weiterer Bereich dieser Arbeit beschäftigte sich mit dem Einfluss einer weiteren Komponente von Telepräsenzsystemen, nämlich Eigenschaften und Variablen des Benutzers, auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung:

- (2) Welchen Einfluss haben Persönlichkeitsvariablen wie beispielsweise Motivation und Aufmerksamkeitsprozesse auf das Präsenzerleben und die Aufgabenleistung?

Im Kapitel 5 wurden Effekte der Übung, der Anpassungsfähigkeit, der Leistungsmotivation, der Konzentrationsfähigkeit, der Involviertheit, der immersiven Tendenz sowie der Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden untersucht.

Bei der Übung zeigten sich interindividuell verschiedene Reaktionen der Versuchspersonen auf das Präsenzepfinden. Es konnten vier Gruppen identifiziert werden. Bei der ersten und am seltensten besetzten Gruppe blieb das Präsenzepfinden konstant. Bei der zweiten Gruppe nahm das Präsenzepfinden mit zunehmenden Übungsdurchgängen

kontinuierlich zu, bei der dritten nahm dieses kontinuierlich ab. Die vierte Gruppe zeigte einen oszillierenden Verlauf des Präsenzepfindens über die Übungsdurchgänge. Die Aufgabenleistungsmaße Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe sowie Anzahl der bewegten virtuellen Objekte bei der vorgegebenen Aufgabe folgten dem Potenzgesetz der Übung über die Durchgänge hinweg.

Die Anpassungsfähigkeit hatte keine Effekte auf das Präsenzepfinden, jedoch zeigte sich eine verbesserte Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe bei Personen mit hoher Anpassungsfähigkeit.

Die Leistungsmotivation und das Konzentrationsvermögen hatten keine Auswirkungen auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistung. Jedoch wurde hier eine vorwiegend motorisch zu bewältigende Aufgabe realisiert. Es ist möglich, dass diese beiden Variablen bei eher kognitiven Aufgaben einen Einfluss zeigen.

Hoch involvierte Personen tendierten zu einer besseren Aufgabenleistung und einem höheren Präsenzepfinden als niedrig involvierte Probanden, dieser Effekt erwies sich jedoch als nicht signifikant. Möglicher Weise wurde in dem Experiment die Involviertheit nicht stark genug induziert. Jedoch folgte bei hoch involvierten Versuchspersonen die ansonsten subjektiv konstante Bearbeitungsgeschwindigkeit dem Potenzgesetz der Übung, die Probanden gaben sich somit mehr Mühe. Daher erscheint es sinnvoll, eine hohe Involviertheit bei den Benutzern von Telepräsenzsystemen zu induzieren.

Die Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen wurde über Störungen und Irritationen aus der aktuellen und aus der virtuellen Umgebung variiert. Störungen in Form von Nebenaufgaben aus der aktuellen und aus der virtuellen Umgebung führten zu einer verschlechterten Zeit bis zur Beendigung der Aufgabe (unabhängig von der Dauer der Bearbeitung der Nebenaufgabe). Das Präsenzepfinden wurde jedoch nicht beeinträchtigt. Dennoch sind Störungen wie beispielsweise Geräusche aus der aktuellen Umgebung bei Telepräsenzsystemen zu vermeiden.

Irritationen aus der virtuellen Umgebung in Form von Änderungen des Hintergrunds zeigten keine Auswirkungen auf die Aufgabenleistung und auf das Präsenzepfinden. Es ist jedoch unklar, ob dies auch bei kognitiven Aufgaben gilt.

Die immersive Tendenz als Persönlichkeitsvariable zeigte über alle Studien in der vorliegenden Arbeit, in der diese erfasst wurde, entweder einen positiven oder keinen Zusammenhang zum Präsenzepfinden. Hier scheint zwar eine positive Beziehung zu bestehen, die jedoch instabil ist und leicht durch andere Variablen und Bedingungen überlagert werden kann. Somit stellt die immersive Tendenz ein Oberflächenmerkmal dar, das keinen Einfluss auf die Aufgabenleistung zu haben scheint.

Für die Untersuchung der Rückmeldung von Informationen aus der vermittelten Umgebung, der dritten untersuchten Komponente von Telepräsenzsystemen, wurden im Kapitel 6 beispielhaft zwei Untersuchungen vorgestellt. Die zu beantwortende Frage lautete:

- (3) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der haptischen und visuellen Darstellung der vermittelten Umgebung mit dem Präsenzepfinden und der Aufgabenleistung?

Bei der Rückmeldung von visuellen Informationen aus der entfernten Umgebung hatte ein erweitertes Gesichtsfeld positive Effekte auf das Präsenzepfinden und die Aufgabenleistungsmaße Distanzschätzung und Erinnerung von Details. Die relevante Wahrnehmungsdimension bestand in der vollständigen Darstellung der Szene, d.h. dass bei Kopfbewegungen des Benutzers auch bei langsamen Kamerabewegungen vorübergehend kein schwarzes Bild, sondern ein virtuelles Modell der Szene angezeigt wurde.

Die Darbietung der entfernten Umgebung über ein Head Mounted Display hatte im Vergleich zu der Darbietung über eine Leinwand positive Auswirkungen auf die Aufgabenleistung. Dieser Effekt kann der besseren dreidimensionalen Sicht zugeschrieben werden.

Bei der haptischen Manipulation der entfernten Umgebung konnte nachgewiesen werden, dass Benutzer sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen intuitiv und effektiv nutzen. Bei der Verfügbarkeit von rotatorischen Freiheitsgraden wurden die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden im Vergleich zur Bereitstellung von rein translatorischen Bewegungsmöglichkeiten verbessert. Bei hoch optimierten Ein-/Ausgabegeräten bei Telepräsenzsystemen sollten dem Benutzer alle möglichen Freiheitsgrade der Bewegung zur Verfügung gestellt werden.

In der abschließenden Abbildung 7.01 werden die in der vorliegenden Arbeit gefundenen positiven Effekte der untersuchten Variablen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden der einzelnen Komponenten von Telepräsenzsystemen zusammengefasst. Dabei wird deutlich, dass das Präsenzepfinden hauptsächlich durch die Qualität der dargestellten Informationen zustande kommt und nur in geringem Maße durch Persönlichkeitseigenschaften und –variablen des Benutzers bestimmt wird.

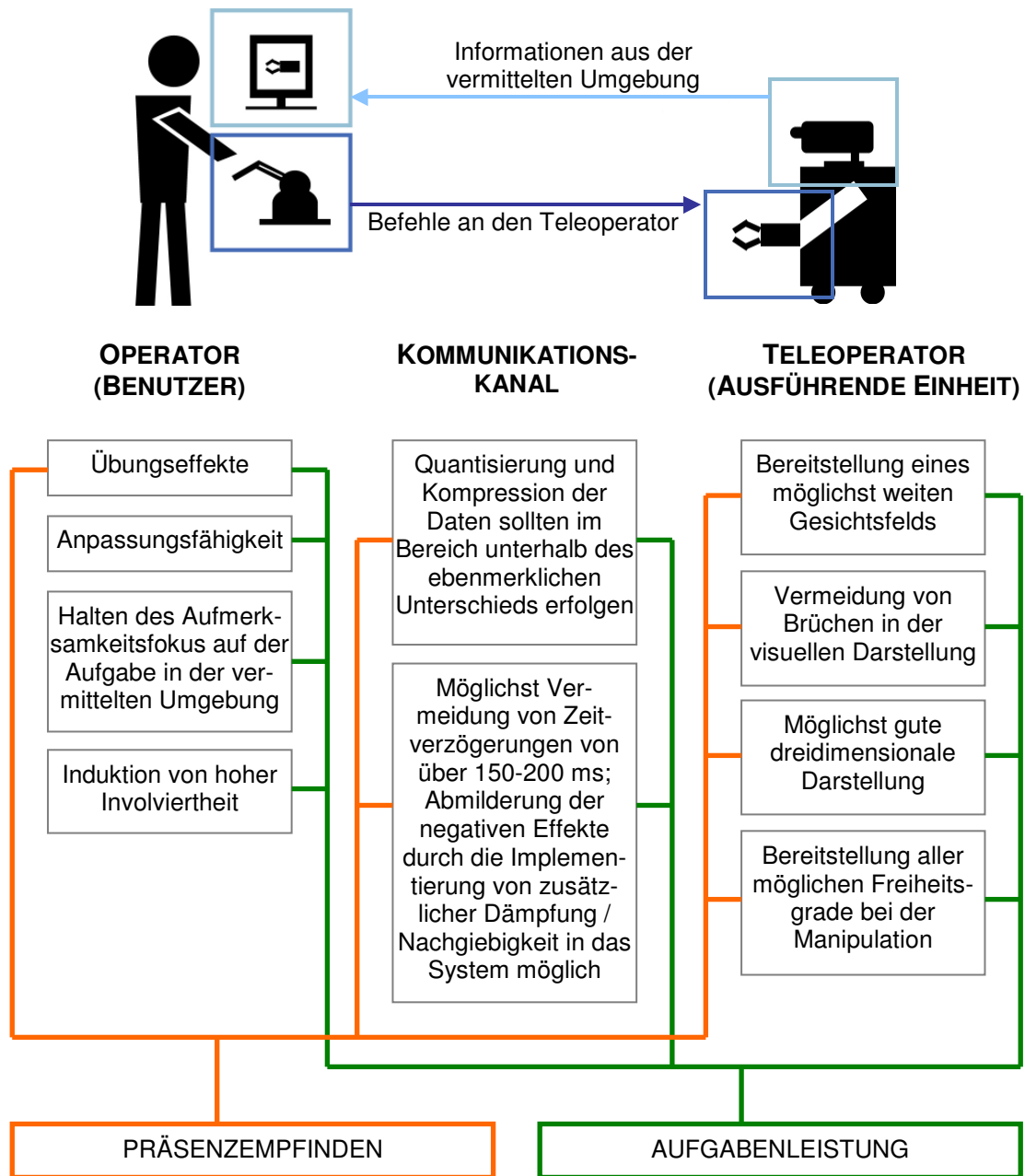


ABBILDUNG 7.01. Zusammengefasst positive Effekte der Einzelkomponenten von Telepräsenzsystemen auf die Aufgabenleistung und das Präsenzepfinden.

Literaturverzeichnis

- Adachi, Y., Kumano, T. & Ogino, K. (1995) Intermediate representation of stiff virtual objects. *Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'95)*, 203.
- Akin, D.L., Minsky, M.L., Thiel, E.D. & Kurtzmann, C.R. (1983). Space applications of automation, robotics and machine intelligence systems (ARAMIS), *Phase II, Vol. 1-3 NASA Contractor Reports no. 3734-6*, for Contract NAS8-34381.
- Alfano, P.L. & Michel, G.F. (1990). Restricting the field of view: Perceptual and performance effects. *Perceptual and Motor Skills*, 70(1), 35-45.
- Allin, S., Matsuoka, Y. & Klatzky, R. (2002). Measuring just noticeable differences for haptic force feedback: A tool for rehabilitation. *Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual and Teleoperator Systems (HAPTICS 2002)*, 299-302.
- Allport, D.A. (1987). Selection for action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. In H. Heuer & A.F. Sanders (Eds.). *Perspectives on Perception and Action*, pp. 395-419. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Anania, L. (2002). What do we need presence for? *Cognition, Technology & Work*, 6(1), 60-62.
- Anderson, J.R. (1996). *Kognitive Psychologie* (2. Aufl). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Anderson J., Ashraf, N., Douthet, C. & Jack, M.A. (2001). Presence and usability in shared space virtual conferencing: A participatory design study. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 287-305.
- Anzai, A., Bearnse Jr., M.A., Freeman, R.D. & Cai, D. (1995). Contrast coding by cells in the cat's striate cortex monocular vs. binocular detection. *Visual Neuroscience*, 12, 77-93.
- Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of stimulus orientation: The oblique effect in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78, 266-278.
- Atkinson, J.W. & Feather, N.T. (1966). *A Theory of Achievement Motivation*. New York, NY: Wiley & Sons.
- Bamber, H.K. (1969). Reaction times and error rates for "same"- "different" judgements of multi-dimensional stimuli. *Perception and Psychophysics*, 6, 196-174.
- Bandini, S., Manzoni, S., Nunnari, F. & Simone, C. (2003). Supporting the sense of presence in control environments. *Cognition, Technology & Work*, 6(1), 49-52.
- Barbagli, F., Salisbury, K., Ho, C., Spence, C. & Tan, H. (2006). Haptic discrimination of force direction and the influence of visual information. *ACM Transactions on Applied Perception*, 3(2), 125-135.
- Barfield, W., Baird, K.M. & Bjorneseth, O.J. (1998). Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate. *Displays*, 19, 91-98.
- Barfield, W. & Danas, E. (1996). Comments on the use of olfactory displays for virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(1), 109-121.
- Barfield, W. & Hendrix, C. (1995a). Factors affecting presence and performance in virtual environments. In K. Morgan, R.M. Satava, H.B. Sieburg, R. Mattheus & J.P. Christensen (Eds.). *Interactive Technology and the New Paradigm for Healthcare*, pp. 21-28. IOS Press and Ohmsha.
- Barfield, W. & Hendrix, C. (1995b). The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, 1(1), 3-15.
- Barfield, W. & Weghorst, S. (1993). The sense of presence within virtual environments: A conceptual framework. In G. Salvendy & M.J. Smith (Eds.). *Human-computer interaction: Software and hardware interfaces*, pp. 699-704. Amsterdam: Elsevier.

- Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T. & Slater, M. (1995). Presence and performance within virtual environments. In W. Barfield & T.A. Furness (Eds.). *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pp. 473-513. New York, N.Y.: Oxford University Press, Inc.
- Basil, M.D. (2001). The importance of identification to a sense of presence. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Baud-Bovy, G. & Gentaz, E. (2006). The haptic reproduction of orientations in three-dimensional space. *Experimental Brain Research*, 172, 283-300.
- Bejczy, A.K. & Kim, W.S. (1990). Predictive displays and shared compliance control for time-delayed telemanipulation. *Proceedings of the IEEE International Workshop in Intelligent Robots and Systems (IROS'90)*, 1, 407-412.
- Bensmaïa, S.J. & Hollins, M. (2003). The vibrations of texture. *Somatosensory and Motor Research*, 20, 33-43.
- Berger, A. & Khosla, P.K. (1991). Using tactile data for real-time feedback. *International Journal of Robotics Research*, 10(2), 88-102.
- Berglund, B., Berglund, U. & Ekman, G. (1967). Temporal integration of vibrotactile stimulation. *Perceptual and Motor Skills*, 25, 549-560.
- Bernstein, N. A. (1967). *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Pergamon Press: Oxford.
- Biocca, F. (2001). Inserting the presence of mind into a philosophy of presence: A response to Sheridan and Mantovani and Riva. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(5), 546-556.
- Biocca, F., Burgoon, J., Harms, C. & Stoner, M. (2001). Criteria and scope conditions for a theory and measure of social presence. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Biocca, F., Harms, C. & Burgoon, J.K. (2003). Toward a more robust theory and measure of social presence: Review and suggested criteria. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 456-480.
- Biocca, F., Harms, C. & Gregg, J. (2001). The networked minds measure of social presence: Pilot test of the factor structure and concurrent validity. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Biocca, F.A. & Rolland, J.P. (1998). Virtual eyes can rearrange your body: Adaptation to visual displacement in see-through, head-mounted displays. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 262-277.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R.F. (1996). *Biologische Psychologie* (3. Aufl.). Berlin: Springer-Verlag.
- Blake, E., Casanueva, J. & Nunez, D. (2000). Presence as a means for understanding user behaviour in virtual environments. *South African Computer Journal*, 26, 247-251.
- Bliss, J.C., Crane, H.D., Mansfield, P.K. & Townsend, J.T. (1966). Information available in brief tactile presentations. *Perception & Psychophysics*, 1(8), 273-283.
- Bolanowski, Jr., S.J., Gescheider, G.A., Verrillo, R.T. & Checkosky, C.M. (1988). Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1680-1694.
- Boorstin, J. (1995). *Making Movies Work: Thinking Like a Film-Maker*. Beverly Hills: Silman-James Press.
- Bootsma, R.J., Marteniuk, R.G., MacKenzie, C.L. & Zaal, F.T. (1994). The speed-accuracy trade-off in manual prehension: Effect of movement amplitude, object size and object width on kinematic characteristics. *Experimental Brain Research*, 98, 535-541.
- Boring, E.G. (1957). *A History of Experimental Psychology* (2nd Ed.). New York: Appleton Century Crofts.
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (6. Aufl.). Heidelberg: Springer-Verlag.

- Bresciani, J.-P., Drewing, K., Zopf, R., Wimperis, A., Lovell, G., Giachristis, C., Roberts, R., Hesse, C., Helbig, H., Lange, C., Vitello, M., Bouyer, G., Maury, V., Kheddar, A., Bracewell, M., Wing, A., Ernst, M. (2005). System specifications design guidelines. *Work Package WP5, TOUCH-HapSys*.
- Brickenkamp, R. (2002). *Test d2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test*. Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Brickenkamp, R. & Karl, G.A. (1986). Geräte zur Messung von Aufmerksamkeit, Konzentration und Vigilanz. In R. Brickenkamp (Hrsg.). *Handbuch apparativer Verfahren in der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Broadbent, D.E. (1958). *Perception and Communication*. New York: Oxford University Press.
- Brodie, E.E. & Ross, H.E. (1986). Degrees of freedom of movement in weight discrimination: Effect of stimulus intensity. In B. Berglund, U. Berglund & R. Teghtsoonian (Eds.). *Fecher Day 86. International Society for Psychophysics*, pp. 15-20.
- Brogni, A., Slater, M. & Steed, M. (2003). More breaks less presence. *Proceedings of the 6th Annual International Workshop on Presence*, 2003.
- Brogni, A., Vinayagamoorthy, V. Steed, A. & Slater, M. (2005). Detecting and understanding breaks in presence from physiological data: Work in progress. *Proceedings of HCI International 2005, The 11th International Conference on Human Computer Interaction, Volume 9 - Advances in Virtual Environment Technology: Musings on Design, Evaluation, and Applications*, 2005.
- Brooks, T.L. (1990). Telerobotic response requirements. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 113-120.
- Brooks Jr., F.P., Ouh-Young, M., Batter, J.J. & Kilpatrick, P.J. (1990). Project GROPE - Haptic displays for scientific visualization. *Computer Graphics*, 24(24), 177-185.
- Brouwer, I., MacLean, K.E. & Hodgson, A.J. (2004). Simulating cheap hardware: A platform for evaluating cost-performance trade-offs in haptic hardware design. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04)*, 1, 770-775.
- Burdea, G.C. (1996). *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. New York: John Wiley & Sons, Inc..
- Burkert, T., Leupold, J. & Passig, G. (2004). A photorealistic predictive display. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(1), 22-43.
- Buzan, F.T. & Sheridan, T.B: (1989). A model-based predictive operator aid for telemanipulators with time delay. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1, 138-143.
- Bystrom, K.-E., Barfield, W. & Hendrix, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 241-244.
- Caldwell, D.G., Lawther, S. & Wardle, A. (1996). Multi-modal cutaneous tactile feedback. *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 96)*, 2, 465-472.
- Card, S.K., Moran, T.P. & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Carr, K.T. & England, R.D. (1993). The role of realism in virtual reality. *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Virtual Reality*, 1993, 24-33.
- Cascio, C.J. & Sathian, K. (2001). Temporal cues contribute to tactile perception of roughness. *The Journal of Neuroscience*, 21(14), 5289-5296.
- Cassidy, T. & Lynn, R. (1989). A multifactorial approach to achievement motivation: The development of a comprehensive measure. *Journal of Occupational Psychology*, 62, 301-312.
- Chang, S., Kim, J., Kim, I., Borm, J.H., Lee, C. & Park, J.O. (1999). Time delay analysis in teleoperation system. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction*, 86-91.

- Checkosky, C.M. & Bolanowski, S.J. (1994). The effect of stimulus duration on frequency-response functions in the Pacinian (P) channel. *Somatosensory and Motor Research*, 11(1), 47-56.
- Chernikoff, R. & Taylor, F.V. (1952). Reaction time to kinesthetic stimulation resulting from sudden arm displacement. *Journal of Experimental Psychology*, 43(1), 1-8.
- Chios, P. & Linney, A. (2004). The design process of an autostereoscopic viewing interface for computer-aided microsurgery. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1, 136-143.
- Choi, S. & Tan, H.Z. (2004a). Effect of update rate on perceived instability of virtual haptic texture. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3577-3582.
- Choi, S. & Tan, H.Z. (2004b). Perceived instability of virtual haptic texture. I. Experimental studies. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4), 395-415.
- Choi, S. & Tan, H.Z. (2005). Discrimination of virtual haptic textures rendered with different update rates. *World Haptics Conference (WHC 2005)*, 114-119.
- Colgate, J.E. & Brown, J.M. (1994). Factors affecting the z-width of a haptic display. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994.
- Colgate, J.E., Grafing, P.E., Stanley, M.C. & Schenkel, G. (1993). Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces. *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VR'93)*, 1993, 202-208.
- Colgate, J.E., Stanley, M.C. & Brown, J.M. (1995). Issues in the haptic display of tool use. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'95)*, 3, 140-145.
- Colgate, J.E., Stanley, M.C. & Schenkel, G.G. (1993). Dynamic range of achievable impedances in force reflecting interfaces. *Proceedings of the SPIE: Telemicrooperator Technology and Space Robotics*, 1993.
- Conklin, W. & Tosunoglu, S. (1996). Conceptual design of a universal bilateral manual controller. *1996 Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, 1996.
- Connor, C.E. & Johnson, K.O. (1992). Neural coding of tactile texture: Comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception. *The Journal of Neuroscience*, 12, 3414-3426.
- Conrads, D. (2001). *Telekommunikation. Grundlagen, Verfahren, Netze* (4. Aufl.). Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- Costa Jr., P.T. & McCrae, R.R. (1985). The NEO personality inventory. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.
- Craig, J.C. (1972). Difference threshold for intensity of tactile stimuli. *Perception & Psychophysics*, 11(2), 150-152.
- Craig, J.C. (1974). Vibrotactile difference thresholds for intensity and the effect of a masking stimulus. *Perception & Psychophysics*, 15(1), 123-127.
- Craig, J.C. (1985). Tactile pattern perception and its perturbations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 238-246.
- Craig, J.C. & Sherrick, C.E. (1969). The role of skin coupling in the determination of vibrotactile spatial summation. *Perception & Psychophysics*, 6(2), 97-101.
- Creem-Regehr, S., Willemsen, P., Gooch, A. & Thompson, W. (2003). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual environments. *Technical Report UUCS-03-016*, School of Computing, University of Utah.
- Dai, F. (2001). Remote supervision and task-level control of industrial robot systems using augmented vision. *Automatisierungstechnik*, 49(7), 329-335.

- Darken, R.P., Bernatovich, D., Lawson, J.P. & Peterson, B. (1999). Quantitative measures of presence in virtual environments: The role of attention and spatial comprehension. *CyberPsychology & Behavior*, 2(4), 337-347.
- De Greef, P. & Ijsselstein, W.A. (2001). Social presence in a home tele-application. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 307-315.
- Deml, B. (2004). *Telepräsenzsysteme: Gestaltung der Mensch-System Schnittstelle*. Dissertation, München: Universität der Bundeswehr, Institut für Arbeitswissenschaft.
- Deutsch, J.A. & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70, 80-90.
- DeValois, R.L., Albrecht, D.G. & Thorell, L.G. (1982). Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, 22, 545-559.
- Dhruv, N. & Tendick, F. (2000). Frequency dependence of compliance contrast detection. *Proceedings of the ASME, Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 69-2*, 1087-1093.
- Dillon, C., Keogh, E., Freeman, J. & Davidoff, J. (2001). Presence: Is your heart in it? *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- DIN 44300/2. Deutsches Institut für Normung e.V.: Informationsverarbeitung - Teil 2. Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- Dinnerstein, A.J. & Zlotogura, P. (1968). Intermodal perception of temporal order and motor skills: Effects of age. *Perceptual and Motor Skills*, 26, 987 - 1000.
- Dosher, J. & Hannaford, B. (2005). Human interaction with small haptic effects. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3), 329-344.
- Draper, J.V., Kaber, D.B. & Usher, J.M. (1998). Telepresence. *Human Factors*, 40(3), 354-375.
- Drewing, K., Fritschi, M., Zopf, R. Ernst, M.O. & Buss, M. (2005). First evaluation of a novel tactile display exerting shear force via lateral displacement. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(2), 118-131.
- Durlach, P.J., Fowlkes, J. & Metevier, C.J. (2005). Effect of variations in sensory feedback on performance in a virtual reaching task. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4), 450-462.
- Durlach, N. & Slater, M. (2000). Presence in shared virtual environments and virtual togetherness. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(2), 214-217.
- Ekman, G., Hosman, J. & Linström, B. (1965). Roughness, smoothness, and preference: A study of quantitative relations in individual subjects. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 18-26.
- Elhadj, I., Weersinghe, H., Dika, A. & Hansen, R. (2006). Human perception of haptic force direction. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, 2006.
- Ellis, S.R. (1995). Human engineering in virtual environments. *Virtual Reality World '95 Conference Documentation*. München: Computerwoche Verlag GmbH.
- Ellson, D. C. (1947). The independence of tracking in two and three dimensions with B-29 pedestal sight. *Report TSEAA-694-2G*, Aero Medical Laboratory.
- England, R. (1995). Sensory-motor systems in virtual manipulation. In R. England & K. Carr (Eds.). *Simulated and virtual realities: Elements of perception*, pp. 131-177. Philadelphia: Taylor & Francis.
- Eriksen, B.A. & Eriksen, C.W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-149.
- Ernst, B.B. & Banks, M. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415, 429-433.

- Essock, E.A. (1980). The oblique effect of stimulus identification considered with respect to two classes of oblique effects. *Perception*, 24, 631-646.
- Essock, E.A., Krebs, W.K. & Prather, J.R. (1997). Superior sensitivity for tactile stimuli oriented proximally-distally on the finger: Implications of mixed Class 1 and Class 2 anisotropies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 515-527.
- Eysenck, H.J. (1947). *Dimensions of personality*. London: Routledge.
- Eysenck, H.J. (1975). *Vererbung, Intelligenz und Erziehung*. Stuttgart: Seewald.
- Exner, S. (1875). Experimentelle Untersuchung der einfachsten psychischen Prozesse: III. Der persönlichen Gleichung zweiter Theil. *Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 11, 403-432.
- Fechner, G.T. (1907). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf.
- Ferrell, W.R. (1964). *Remote Manipulation with Transmission Delay*. PhD Thesis on the Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering.
- Ferrell, W.R. (1966). Delayed force feedback. *Human Factors*, 8, 449-455.
- Fisher, C. & Bornstein, M.H. (1982). Identification of symmetry: Effects of stimulus orientation and head position. *Perception & Psychophysics*, 32, 443-448.
- Fiske, D.W. (1949). Consistency of the factorial structures of personality ratings from different sources. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 44, 329-344.
- Fitch, H.L., Tuller, B. & Turvey, M.T. (1982). The Bernstein perspective III. Tuning of coordinative structures with special reference to perception. In J.A.S. Kelso (Ed.). *Human Motor Behavior*, pp. 271-282. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Flach, J.M. & Holden, J.G. (1998). The reality of experience: Gibson's way. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1), 90-95.
- Franzén, O. & Nordmark, J. (1975). Vibrotactile frequency discrimination. *Perception & Psychophysics*, 17(5), 480-484.
- Freeman, J. & Avons, S.E. (2000). Focus group exploration of presence through advanced broadcast services. *Proceedings of the SPIE*, 3959, 530-539.
- Freeman, J., Avons, S.E., Pearson, D.E. & Ijsselstein, W.A. (1999). Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1), 1-13.
- Freeman, J., Lessiter, J. & Ijsselstein, W. (2001). An introduction to presence: A sense of being there in a mediated environment. *The Psychologist*, 2001, *British Psychological Society*, 1-15.
- Freeman, J., Lessiter, J., Pugh, K. & Keogh, E. (2005). When presence and emotion are related, and when they are not. *Proceedings of the 8th Annual International Workshop on Presence*, 2005, 213-219.
- Freyberger, F.K.B. (2008). *Gestaltung visuell-haptischer Telepräsenz- und Teleaktionssysteme mittels psychologischer Grundlagen*. Dissertation, München: Universität der Bundeswehr, Institut für Arbeitswissenschaft.
- Freyberger, F.K.B. & Färber, B. (2006). Psychophysics and perceiving granularity. *14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 387-393.
- Furmanski, C., Azuma, R. & Daily, M. (2002). Augmented-reality visualizations guided by cognition:

- Perceptual heuristics for combining visible and obscured information. *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, 215-224.
- Gardner, J. F. (1950). Direction of pointer motion in relation to the movement of flight controls: Cross-pointer type instrument. *AF Technical Report 6016*, Wright-Patterson, AFB, OH: Air Material Command.
- Geldard, F.A. (1940). The perception of mechanical vibration. *Journal of General Psychology*, 22, 243-308.
- Geldard, F.A. (1972). *The Human Senses* (2nd Ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Gentaz, E. & Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Perception & Psychophysics*, 58, 1278-1292.
- Gerdsen, P. & Kröger, P. (1993). *Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gescheider, G.A. (1965). Cutaneous sound localization. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 617-625.
- Gescheider, G.A. (1985). *Psychophysics. Method, Theory and Application* (2nd Ed.). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gibbs, C.B. (1965). Probability learning in step-input tracking. *The British Journal of Psychology*, 56(2/3), 233-242.
- Gibson, J.J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gibson, J.J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477-491.
- Gibson, J.J. (1982). *Wahrnehmung und Umwelt*. München: Urban & Schwarzenberg.
- Glaser, W.R. (1997). Wahrnehmung. In J. Straub, W. Kempf & H. Werbik (Hrsg.). *Psychologie. Eine Einführung. Grundlagen, Methoden, Perspektiven*. (S. 225-248). München: Deutscher Taschenbuch Verlag.
- Glencross, D.J. (1977). Control of skilled movements. *Psychological Bulletin*, 84(1), 14-29.
- Goble, A.K., Collins, A.A. & Cholewiak, R.W. (1996). Vibrotactile threshold in young and old observers: The effects of spatial summation and the presence of a rigid surround. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 2256-2269.
- Goff, G.D. (1967). Differential discrimination of frequency of cutaneous mechanical vibration. *Journal of Experimental Psychology*, 74(2), 294-299.
- Goldstein, E.B. (1996). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Gommlich, H. & Schuon, E. (1995). *Datenfernübertragung und ihre Meßtechnik*. Berlin: Schiele und Schön GmbH.
- Greenspan, J.D. & Bolanowski, S.J. (1996). The psychophysics of tactile perception and its peripheral physiological basis. In L. Kruger (Ed.). *Pain and Touch*, pp. 25-103. San Diego: Academic Press Inc..
- Greer, T. & Dunlap, W.P. (1997). Analysis of variance with ipsative measures. *Psychological Methods*, 2, 200-207.
- Hannig, G., Deml, B. & Mihalyi, A. (2007). Simulating surface roughness in virtual environments by vibrotactile feedback. *IFAC Symposium - Analysis, Design and Evaluation of Human-Machine Systems*, 2007.
- Hasegawa, S., Ishii, M., Sato, M. & Koike, Y. (2000). Process division in haptic display system. *7th International Conference on Parallel and Distributed Systems: Workshops*, 219-224.
- Hecht, D., Reiner, M. & Halevy, G. (2005). Multi-modal stimulation, response time, and presence. *Proceedings of the 8th Annual International Workshop on Presence*, 2005, 269-274.

- Heckhausen, H. (1989). *Motivation und Handeln*. Berlin: Springer-Verlag.
- Heeter, C. (1992). Being there: The subjective experience of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2), 262-271.
- Heeter, C. (2001). Reflections on real presence by a virtual person. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Held, R. & Durlach, N. (1991). Telepresence, time delay and adaptation. In S.R. Ellis, M.K. Kaiser & A.C. Grunwald (Eds.). *Pictorial communication in virtual and real environments*, pp. 232-246. London: Taylor & Francis Ltd..
- Held, R.M. & Durlach, N.I. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 109-112.
- Held, R., Efstathiou, A & Greene, M. (1966). Adaptation to displaced and delayed visual feedback from the hand. *Journal of Experimental Psychology*, 72(6), 887-891.
- Heller, M., Calcaterra, J., Green, S. & Brown, L. (1999). Intersensory conflict between vision and touch: The response modality dominates when precise action-riveting judgments are required. *Perception & Psychophysics*, 61(7), 1384-1398.
- Heller, M.A. & Joyner, T.D. (1993). Mechanisms in the haptic horizontal-vertical illusion: Evidence from sighted and blind subjects. *Perception & Psychophysics*, 53(4), 422-428.
- Hendrix, C. & Barfield, W. (1995). Presence in virtual environments as a function of visual and auditory cues. *Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'95)*, 74-82.
- Hendrix, C. & Barfield, W. (1996a). Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 274-289.
- Hendrix, C. & Barfield, W. (1996b). The sense of presence within auditory virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), 290-301.
- Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M. (1995). *Physik für Ingenieure*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Hess, R.A. & Teichgräber, W.M. (1974). Error quantization effects in compensatory tracking tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-4, 343-349.
- Hesse, C.W. & Wing, A.M. (1999). PHANToM psychophysics: Movement detection at the human fingertip. *Proceedings of the First PHANToM Users Research Symposium*, 21-24.
- Hinterseer, P. & Steinbach, E. (2006). A psychophysically motivated compression approach for 3D haptic data. *14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2006.
- Hinterseer, P., Steinbach, E. & Chaudhuri, S. (2006a). Model based data compression for 3D virtual haptic teleinteraction. *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2006)*, 2006.
- Hinterseer, P., Steinbach, E. & Chaudhuri, S. (2006b). Perception-based compression of haptic data streams using Kalman filters. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2006.
- Hinterseer, P. Steinbach, E., Hirche, S. & Buss, M. (2005). A Novel, Psychophysically Motivated Transmission Approach for Haptic Data Streams in Telepresence and Teleaction Systems. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'05)*, 2, 1097 - 1100.
- Hirche, S. (2005). Haptic Telepresence in Packet Switched Communication Networks. *Fortschrittberichte VDI*, 8(1082). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hirche, S., Buss, M., Hinterseer, P. & Steinbach, E. (2005a). Towards deadband control in networked teleoperation systems. *16th International Federation of Automatic Control World Congress (IFAC'05)*, 2005.
- Hirche, S., Buss, M., Hinterseer, P. & Steinbach, E. (2005b). Network traffic reduction in haptic telepresence

- systems by deadband control. *16th International Federation of Automatic Control World Congress (IFAC'05)*, 2005.
- Ho, C., Basdogan, C. & Srinivasan, M.A. (1999). Efficient point-based rendering techniques for haptic display of virtual objects. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 477-491.
- Hofmann, J., Jäger, T.J., Deffke, T. & Bubb, H. (2001). Effects of presence on spatial perception in virtual environments. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Hollins, M. (2002). Touch and haptics. In S. Yantis & H. Pashler (Eds.). *Steven's Handbook of Experimental Psychology* (3rd Ed.), Vol. 1: Sensation and Perception, pp. 585-618. New York: John Wiley & Sons, Inc..
- Hollins, M., Bensmaïa, S., Karlof, K. & Young, F. (2000). Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling. *Perception & Psychophysics*, 62, 1534-1544.
- Hollins, M., Bensmaïa, S.J. & Roy, E.A. (2002). Vibrotaction and texture perception. *Behavioural Brain Research*, 135, 51-56.
- Hollins, M., Bensmaïa, S.J. & Washburn, S. (2001). Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures. *Somatosensory & Motor Research*, 18, 253-262.
- Hollins, M., Fox, A. & Bishop, C. (2001). Imposed vibration influences perceived tactile smoothness. *Perception*, 29, 1455-1465.
- Howard, I.P. (1973). Orientation and motion in space. In E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.). *Handbook of Perception, III. Biology and Perceptual Systems*, pp. 291-315. London: Academic Press.
- Howe, R.D. (1992). A force-reflecting teleoperated hand system for the study of tactile sensing in precision manipulation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1321-1326.
- Hristu, D., Kontarinis, D.A. & Howe, R.D. (1996). A comparison of delay and bandwidth limitations in teleoperation. *Proceedings of the International Federation of Automatic Controls World Congress, Systems Engineering and Management, L*, 331-336.
- Huang, M.P. & Alessi, N.E. (1999). Presence as an emotional experience. In J.D. Westwood, H.M. Hoffman, R.A. Robb & D. Stredney (Eds.). *Medicine Meets Virtual Reality: The Convergence of Physical and Informational Technologies Options for a New Era in Healthcare*, pp. 148-153. Amsterdam: IOS Press.
- Hugony, A. (1935). Über die Empfindung von Schwingungen mittels des Tastsinnes. *Zeitschrift für Biologie*, 96, 548 - 553.
- Ilie, A., Low, K.-L., Welch, G., Lastra, A., Fuchs, H. & Cairns, B. (2004). Combining head-mounted and projector-based displays for surgical training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(2), 128-145.
- Ijsselstein, W. (2002). Elements of a multi-level theory of presence: Phenomenology, mental processing and neural correlates. *Proceedings of the 5th Annual International Workshop on Presence*, 2002, 245-259.
- Ijsselstein, W., Bierhoff, I. & Slangen-de Kort, Y. (2001). Duration estimation and presence. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Ijsselstein, W.A. & de Ridder, H. (1998). Measuring temporal variations in presence. *Workshop on Presence in Shared Virtual Environments*, 1998.
- Ijsselstein, W.A., Freeman, J. & de Ridder, H. (2001). Presence: Where are we? *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 179-182.
- Ikei, Y. & Shiratori, M. (2002). TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures. *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 327.
- Insko, B.E. (2003). Measuring presence: Subjective, behavioral and physiological methods. In G. Riva, F. Davide & W.A. Ijsselstein (Eds.). *Being There: Concepts, Effects and Measurement of User Presence in*

- Synthetic Environments*, pp. 109-119. Amsterdam: IOS Press.
- Israr, A., Choi, S. & Tan, H.Z. (2006). Mechanical impedance of the hand holding an spherical tool at threshold and suprathreshold stimulation levels. *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'2007)*, 56-60.
- Jansson, G., Billberger, K., Petrie, H., Colwell, C., Kornbrot, D., Fänger, J., König, H., Hardwick, A. & Furner, S. (1999). Haptic virtual environments for blind people: Exploratory experiments with two devices. *The International Journal of Virtual Reality*, 4(1), 10-20.
- Jay, C. & Hubbard, R. (1994). Does Performance in the Face of Delayed Sensory Feedback Change with Practice? *Proceedings of Eurohaptics*, pp. 530-533. München: Springer Verlag.
- Jay, C. & Hubbard, R. (2005). Delayed visual and haptic feedback in a reciprocal tapping task. *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC 2005)*, 655-658.
- Jeandrain, A.-C. (2001a). The role of telepresence in exploratory consumer behavior. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Jeandrain, A.-C. (2001b). Essay about telepresence effects on persuasion : Three possible explanations. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Jerome, C.J. & Witmer, B. (2002). Immersive tendency, feeling of presence, and simulator sickness: Formulation of a causal model. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 46th Annual Meeting*, 2197-2201.
- Johansson, R.S., Landström, U. & Lundström, R. (1982a). Responses of mechanoreceptive afferent units in the glabrous skin of the human hand to sinusoidal skin displacement. *Brain Research*, 244, 17-25.
- Johansson, R.S., Landström, U. & Lundström, R. (1982b). Sensitivity to edges of mechanoreceptive afferent units innervating the glabrous skin of the human hand. *Brain Research*, 244, 27-32.
- Johansson, R.S. & Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental Brain Research*, 56, 550-564.
- Johnson, K. (2002). Neural basis of haptic perception. In H. Pashler & S. Yantis (Eds.), *Steven's Handbook of Experimental Psychology*, Vol. 1: Sensation and Perception (3rd Ed.), pp. 537-583. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Jones, L.A. (1989). Matching forces: Constant errors and differential thresholds. *Perception*, 18(5), 681-687.
- Jones, L.A. & Hunter, I.W. (1990). Influence of the mechanical properties of a manipulandum on human operator dynamics. 1. Elastic stiffness. *Biological Cybernetics*, 62(4), 299-307.
- Jones, L.A., Hunter, I.W. & Irwin, R.J. (1992). Differential thresholds for limb movement measured using adaptive techniques. *Perception & Psychophysics*, 52(5), 529-535.
- Jung, C.G. (1971). Psychological types. In *The Collected Works of C.G. Jung*, vol. 6. Princeton University Press.
- Jurnet, I.A., Beciu, C.C. & Maldonado, J.G. (2005). Individual differences in the sense of presence. *Proceedings of the 8th Annual International Workshop on Presence*, 2005, 133-142)
- Kaboli, S., Zolghadri, M.R. & Homaifar, H. (2003). Effects of sampling time on the performance of direct torque controlled induction motor. *Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'03)*, 2, 1049-1052.
- Kaernbach, C. (2001). Adaptive threshold estimation with unforced-choice tasks. *Perception & Psychophysics*, 63, 1377-1388.
- Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-*

- Journal of Basic Engineering*, 82(D), 35-45.
- Katsura, S., Matsumoto, Y. & Ohnishi, K. (2003). Analysis and experimental validation of force bandwidth for force control. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2, 796-801,
- Katz, D. (1925/1989). *The World of Touch* (reprinted 1989). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kenshalo, D.R. (1971). The cutaneous senses. In J.W. Kling & L.A. Riggs (Eds.). *Woodworth & Schlosberg's Experimental Psychology*, pp. 117-168. N.Y.: Holt, Rinehard & Winston, Inc.
- Kenshalo, D.R. (1986). Somesthetic sensitivity in young and elderly humans. *Journal of Gerontology*, 41(6), 732-742.
- Keyson, D.V. & Houtsma, A.J.M. (1995). Directional sensitivity to a tactile point stimulus moving across the fingerpad. *Perception & Psychophysics*, 57, 738-744.
- Kim, T. & Biocca, F. (1997). Telepresence via television: Two dimensions of telepresence may have different connections to memory and persuasion. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
- Kim, J., De, S. & Srinivasan, M.A. (2002). Computationally efficient techniques for real time surgical simulation with force feedback. *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment & Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*, 51-57.
- Kirman, J.H. (1973). Tactile communication of speech: A review and an analysis. *Psychological Bulletin*, 80, 54-74.
- Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (1999). Tactile roughness perception with a rigid link interposed between skin and surface. *Perception & Psychophysics*, 61(4), 591-607.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J., Hamilton, C., Grindley, M. & Swendsen, R.H. (2003). Feeling textures through a probe: Effects of probe and surface geometry and exploratory factors. *Perception & Psychophysics*, 65(4), 613-631.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Langseth, S. (2003). Watching a cursor distorts haptically guided reproduction of mouse movement. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9, 228-235.
- Klatzky, R.L., Lederman, S. & Reed, C. (1987). There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. *Journal of Experimental Psychology: Genera.*, 116(4), 356-369.
- Klimmt, C., Hartmann, T., Gysbers, A. & Vorderer, P. (2005). The value of reaction-time measures in presence research: Empirical findings and future perspectives. *Proceedings of the 8th Annual International Workshop on Presence*, 2005, 293-298.
- Kontarinis, D.A. & Howe, R.D. (1995). Tactile display of vibratory information in teleoperation and virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4(4), 387-402.
- Konyo, M., Yoshida, A., Tadokoro, S. & Saiwaki, N. (2005). A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*, 3965-3971.
- Krebs, W.K., Esock, E.A. & Prather, J.R. (1991). Encoding information via orientation in tactile displays. *35th Annual Meeting of the Human Factors Society*, 1991.
- Kron, A., Schmidt, G., Petzold, B., Zäh, M., Hinterseer, P. & Steinbach, E. (2004). Disposal of explosive ordnances by use of a bimanual haptic telepresence system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04)*, 2004.
- Kyung, K.-U., Ahn, M., Kwon, D.-S. & Srinivasan, M.A. (2005). Perceptual and biomechanical frequency response of human skin: implication for design of tactile displays. *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC 2005)*, 96-101.

- Kyung, K.-U. & Kwon, D.-S. (2006). Perceived roughness and correlation with frequency and amplitude of vibrotactile stimuli. *Proceedings of EuroHaptics 2006*, 277-282.
- LaBerge, D. (1973). Attention and the measurement of perceptual learning. *Memory & Cognition*, 1, 268-276.
- Lachman, R., Lachman, J.L. & Butterfield, E.C. (1979). *Cognitive Psychology and Information Processing: An Introduction*. Hillsdale, New Jersey: L. Erlbaum Pub..
- Lamoré, P.J. & Keemink, C.J. (1988). Evidence for different types of mechanoreceptors from measurements of the psychophysical threshold for vibrations under different stimulation conditions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 2339-2351.
- LaMotte, R.H. & Mountcastle, V.B. (1975). Capacities of humans and monkeys to discriminate vibratory stimuli of different frequency and amplitude: A correlation between neural events and psychological measurements. *Journal of Neurophysiology*, 38(3), 539-559.
- LaMotte, R.H. & Srinivasan, M.A. (1989). Surface microgeometry: Tactile perception and neural encoding. In O. Franzen & J. Westman (Eds.). *Information Processing in the Somatosensory System*. New York: Stockton Press.
- Lathan, C., Cleary, K. & Traynor, L. (2000). Human-centered design of a spine biopsy simulator and the effects of visual and force feedback on path-tracking performance. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(4), 337-349.
- Lauria, R. (2001). In answer to a quasi-ontological argument: On Sheridan's "Toward an eclectic ontology of presence" and Mantovani and Riva's "Building a bridge between different scientific communities". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(5), 557-563.
- Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 451-468.
- Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M., Le Biller, J. & Congedo, M. (2005). "A4" : A technique to improve perception of contacts with under-actuated haptic devices in virtual reality. *Proceedings of the World Haptics Conference (Joint Eurohaptics Conference and Haptic Symposium)*. (available at <http://www.irisa.fr/siames/GENS/alecuyer/page1.html> [18.05.2005])
- Lederman, S.J. (1974). Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 385-395.
- Lederman, S.J. (1981). The perception of surface roughness by active and passive touch. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18, 253-255.
- Lederman, S.J. (1983). Tactile roughness perception: Spatial and temporal determinants. *Canadian Journal of Psychology*, 37, 498-511.
- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (2004). Multisensory texture perception. In G.A. Calvert, C. Spence & B.E. Stein (Eds.). *The Handbook of Multisensory Processes*, pp. 107-122. MIT-Press.
- Lederman, S.J., Loomis, J.M. & Williams, D. (1982). The role of vibration in the tactile perception of roughness. *Perception & Psychophysics*, 32, 109-116.
- Lederman, S.J. & Taylor, M.M. (1972). Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch. *Perception & Psychophysics*, 12(5), 401-408.
- Lee, K.M. (2004). Presence, explicated. *Communication Theory*, 14(1), 27-50.
- Leek, R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 63, 1279-1292.
- Lelewer, D.A. & Hirschberg, D.S. (1987). Data compression. *ACM Computing Surveys*, 19(3), 261-297.
- 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(3), 282-297.

- Leupold, J. & Behrendt, S. (2005). The hybrid display: A smooth transition between virtual and real views for location unbound observations in telepresence applications. *Joint International COE/HAM-SFB453 Workshop on Human Adaptive Mechatronics and High Fidelity Telepresence*, 25-30.
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), 467-477.
- Lew, J.Y., Repperger, D. & Berlin, J. (2004). Wave variables based teleoperation with time delay: Application to space based laser maintenance. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2912-2919.
- Lindner, J. (2005). *Informationsübertragung. Grundlagen der Kommunikationstechnik*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lok, B., Naik, S., Whitton, M. & Brooks Jr., F.P. (2004). Effects of handling real objects and self-avatar fidelity on cognitive task performance and sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(6), 615-628.
- Lombard, M. & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
- Loomis, J.M. (1992). Distal attribution and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 113-119.
- Loomis, J.M. & Lederman, S.J. (1986). Tactual perception. In K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (Eds.). *Handbook of Perception and Human Performance*. Volume II. Cognitive Processes and Performance, pp. 31-1 - 31-41). New York: John Wiley & Sons.
- Low, K.-L., Ilie, A., Welch, G. & Lastra, A. (2003). Combining head-mounted and projector-based displays for surgical training. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality (VR'03)*, 110-117.
- Low, K.-L., Welch, G., Lastra, A. & Fuchs, H. (2001). Life-sized projector-based dioramas. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality and Software Technology 2001*, 93-101.
- Luce, R.D. & Krumbhansl, C.L. (1988). Measurement, scaling, and psychophysics. In R.C. Atkinson, R.J. Herrnstein, L. Gardner & R.D. Luce (Eds.). *Stevens' Handbook of Experimental Psychology* (2nd Ed.). Vol. 1: Perception and Motivation, pp. 9-74. New York: Wiley & Sons.
- Luciani, A., Urma, D., Marliere, S. & Chevrier, J. (2003). Presence: The sense of believability of inaccessible worlds. *Proceedings of the 2003 International Conference on Cyberworlds (CW'03)*, 2003.
- Luciani, A., Urma, D., Marliere, S. & Chevrier, J. (2004). Presence: The sense of believability of inaccessible worlds. *Computers & Graphics*, 28, 509-517.
- Macchiarella, N. & Vincenzi, D. (2004). Augmented reality in a learning paradigm for flight and aerospace maintenance training. *The 23rd Digital Avionics Systems Conference*, 1(24-28), 5D.1-1 - 5D.1-9.
- MacKenzie, I.S. & Ware, C. (1993). Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Systems. *Human Factors in Computing Systems (INTERCHI 93)*, 488-493.
- Makous, J.C., Friedman, R.M. & Vierck Jr., C.J. (1995). A critical band filter in touch. *The Journal of Neuroscience*, 15, 2808-2818.
- Mandal, N. & Payandeh, S. (1995). Control strategies for robotic contact tasks: An experimental study. *Journal of Robotic Systems*, 12(1), 67-92
- Mania, K. (2001). Connections between lighting impressions and presence in real and virtual environments: An experimental study. *Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics, virtual reality and visualisation*, 119-123.
- Mania, K. & Chalmers, A. (2001). The effects of levels of immersion on memory and presence in virtual environments: A reality centered approach. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 247-264.

- Mantovani, F. & Castelnuovo, G. (2003). Sense of presence in virtual training: Enhancing skills acquisition and transfer of knowledge through learning experience in virtual environments. In G. Riva, F. Davide & W.A. Ijsselstein (Eds.). *Being There: Concepts, Effects and Measurement of User Presence in Synthetic Environments*, pp. 167-181. Amsterdam: IOS Press.
- Mantovani, G. & Riva, G. (1999). "Real" presence: How different ontologies generate different criteria for presence, telepresence, and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 540-550.
- Mantovani, G. & Riva, G. (2001). Building a bridge between different scientific communities: On Sheridan's eclectic ontology of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(5), 537-543.
- Marken, R.S. (1991). Degrees of freedom in behaviour. *Psychological Science*, 2(2), 92-100.
- Marr, D. (1982). *Vision*. New York: Freeman.
- Marsh, T. (2001). Presence as experience: Framework to assess virtual corpsing. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Marsh, T. (2003). Presence as experience: Film informing ways of staying there. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 538-549.
- Masliah, L. E. & Milgram, P. (2000). Measuring the Allocation of Control in a 6 Degree-of-Freedom docking Experiment. *CHI 2000: Conference on Human Factors in Computing Systems*, 25-32.
- Massimino, M.J. & Sheridan, T.B. (1993). Sensory substitution for force feedback in teleoperation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2(4), 344-352.
- Mayer, M.J. (1983). Practice improves adults' sensitivity to diagonals. *Vision Research*, 23, 547-550.
- McCrae, R.R. & Costa, P.T. (1983). Joint factors in self-reports and ratings: Neuroticism, extraversion and openness to experience. *Personality and Individual Differences*, 4(3), 245-255.
- McCrae, R.R. & Costa Jr., P.T. (1987). Validation of the five-factor model of personality across instruments and observers. *Journal of Personality and Social Psychology*, 52(1), 81-90.
- McGee, M.R., Gray, P.D. & Brewster, S.A. (2001). Haptic perception of virtual roughness. *Conference on Human Factors in Computing Systems*, 155-156.
- McGee, M.R., Gray, P.D. & Brewster, S.A. (2002). Mixed feelings: Multimodal perception of virtual textures. *Proceedings of Eurohaptics 2002*.
- McLaughlin, M., Sukhatme, G., Peng, W., Zhu, W. & Parks, J. (2003). Performance and co-presence in heterogeneous haptic collaboration. *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'03)*, 2003.
- Meehan, M., Insko, B., Whitton, M. & Brooks Jr., F.P. (2001). Physiological measures of presence in virtual environments. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Meehan, M., Razaque, S., Insko, B., Whitton, M. & Brooks Jr., F.P. (2005). Review of four studies on the use of physiological reaction as a measure of presence in stressful virtual environments. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 30(3), 239-258.
- Meehan, M., Razaque, S., Whitton, M.C. & Brooks Jr., F.P. (2003). Effect of latency on presence in stressful virtual environments. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2003 (VR'03)*, 2003.
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *Omni Magazine*, June 1980, 45-52.
- Minsky, M., Ouh-Young, M., Steele, O., Brooks Jr., F.P. & Behensky, M. (1990). Feeling and seeing: Issues in force display. *Proceedings of the 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 235-241.
- Mitsuki, M., Miyasaka, M. & Ozawa, K. (2005). Reproduced sound pressure level yielding the maximum

- auditory presence: Further study on effects of reproduced SPLs on auditory presence. *Acoustical Science and Technology*, 26(1), 79-81.
- Moon, B.R. (1996). Sampling rates, aliasing, and the analysis of electrophysiological signals. *Proceedings of the 1996 15th Southern Biomedical Engineering Conference*, 401-404.
- Mountcastle, V.B., LaMotte, R.H. & Carli, G. (1972). Detection thresholds for stimuli in humans and monkeys: Comparison with threshold events in mechanoreceptive afferent nerve fibers innervating the monkey hand. *Journal of Neurophysiology*, 35(1), 122-136.
- Mountcastle, V.B., Talbot, W.H., Sakata, H. & Hyvärinen, J. (1969). Cortical neuronal mechanisms in flutter-vibration studied in unanesthetized monkeys: Neuronal periodicity and frequency discrimination. *Journal of Neurophysiology*, 32(3), 452-484.
- Mowbray, G.H. & Gebhard, J.W. (1957). Sensitivity on the skin to changes in rate of intermittent mechanical stimuli. *Science*, 125(3261), 1297-1298.
- Moy, G., Singh, U., Tan, E. & Fearing, R. (2000). Human psychophysics for teletaction system design. *Haptics*, 1(3).
- 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.
- Neely, J.H. (1977). Semantic priming and retrieval from lexical memory roles of inhibitionless spreading activation and limited-capacity attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 106(3), 226-254.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York: Appleton.
- Neuman, O. (1987). Beyond capacity: A functional view of attention. In H. Heuer & A.F. Sanders (Eds.), *Perspectives on Perception and Action*, pp. 361-394. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Nichols, S., Haldane, C. & Wilson, J.R. (2000). Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 471-491.
- Nicovich, S.G., Boller, G.W. & Cornwell, T.B. (2005). Experienced presence within computer-mediated communications: Initial explorations on the effects of gender with respect to empathy and immersion. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 10(2).
- Niemeyer, G. (1996) *Using Wave Variables in Time Delayed Force Reflecting Teleoperation*. PhD thesis, MIT, Cambridge, MA.
- Niemeyer, G. & Slotine, J.-J.E. (1997a). Using wave variables for system analysis and robot control. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1619-1625.
- Niemeyer, G. & Slotine, J.-J.E. (1997b). Designing force reflecting teleoperators with large time delay to appear as virtual tools. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Niemeyer, G. & Slotine, J.-J.E. (2004). Telemanipulation with time delays. *The International Journal of Robotics Research*, 23(9), 873-890.
- Norman, W.T. (1963). Toward an adequate taxonomy of personality attributes: Replicated factor structure in peer nomination personality ratings. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 66, 574-583.
- Nowak, K. (2001). Defining and differentiating copresence, social presence and presence as transportation. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Nowak, K. & Biocca, F. (2001). Understanding the influence of agency and anthropomorphism on copresence, social presence and physical presence with virtual humans. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Nowak, K.L. & Biocca, F. (2003). The effect of agency and anthropomorphism on user' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*,

- 12(5), 481-494.
- Nunez, D. & Blake, E. (2005) Learning, experience and cognitive factors in the presence experience of gamers: An exploratory relational study. *Proceedings of the 8th Annual International Workshop on Presence*, 2005, 335-338.
- Oboe, R. (2003). Force-reflecting teleoperation over the internet: The JBIT project. *Proceedings of the IEEE*, 91(3), 449-462.
- Okamura, A.M., Cutkosky, M.R. & Dennerlein, J.T. (2001). Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6(3), 245-252.
- Okamura, A.M., Dennerlein, J.T. & Howe, R.D. (1998). Vibration feedback models for virtual environments. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1, 674-679.
- Ottensmeyer, M.P., Hu, J., Thompson, J.M., Ren, J. & Sheridan, T.B. (2000). Investigations into performance of minimally invasive telesurgery with feedback time delays. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(4), 369 - 382.
- Ozawa, K., Chujo, Y., Suzuki, Y. & Sone, T. (2003). Psychological factors involved in auditory presence. *Acoustical Science and Technology*, 24(1), 42-44.
- Pai, D.K., Doel, K. v.d., James, D.L., Lang, J., Lloyd, J.E., Richmond, J.L. & Yau, S.H. (2001). Scanning physical interaction behavior of 3D objects. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, article no. 154.
- Palmer, S.E. & Hemenway, K. (1978). Orientation and symmetry: Effects of multiple, rotational, and near symmetries. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 691-702.
- Pan, X.D., Tan, H.Z. & Durlach, N.I. (1991). Manual discrimination of force using active finger motion. *Perception & Psychophysics*, 49(6), 531-540.
- Peabody, D. & Goldberg, L.R. (1989). Some determinants of factor structures from personality-trait descriptors. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57(3), 552-567.
- Peer, A. (2005). Classification and control of collaborative telemanipulation systems. *Technical Report*, Institute of Automatic Control Engineering, Technische Universität München.
- Petty, R.E. & Cacioppo, J.T. (1986). *Communication and Persuasion – Central and Peripheral Routes to Attitude Change*. New York: Springer.
- Plamondon, R. & Alimi, A.M. (1997). Speed/accuracy trade-offs in target directed movements. *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 279-339.
- Poling, G.L., Weisenberger, J.M. & Kerwin, T. (2003). The role of multisensory feedback in haptic surface perception. *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS 2003)*, 187-194.
- Pongrac, H. & Bongartz, S. (2007). *Adaptabilitätsfragebogen zur Messung der Geschwindigkeit der Anpassung an veränderte äußere Umstände*. Unveröffentlichtes Manuskript, München: Universität der Bundeswehr, Institut für Arbeitswissenschaft.
- Pongrac, H. & Färber, B. (2005). A model of haptic perception for determining the feedback requirements in telemanipulation systems. *Joint International COE/HAM - SFB 453 Workshop on Human Adaptive Mechatronics and High Fidelity Telepresence*, 73-78.
- Pongrac, H., Reiter, A., Färber, B. & Zäh, M.F. (2007). Evaluation of joystick sensitivity in telemanipulative microassembly. *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE 2007)*, 71-75.
- Posner, M.I. & Boies, S.J. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, 78(5), 391-408.

- Posner, M.I, Boies, S.W., Eichelman, W. & Taylor, R. (1969). Retention of visual and name codes of single letters. *Journal of Experimental Psychology Monography*, 79, 1-16.
- Posner, M.I. & Snyder, C.R.R. (1975). Facilitation and inhibition in the processing of signals. *Attention and Performance V*, pp. 669-681, New York Press.
- Pspotka, J., Lewis, S. & King, D. (1998). Effects of field of view on judgments of self-location: Distortions in distance estimations even when the image geometry exactly fits the field of view. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4), 352-369.
- Pulakos, E.D., Schmitt, N. Dorsey, D.W., Arad, S., Hedge, J.W. & Borman, W.C. (2002). Predicting adaptive performance: Further tests of a model of adaptability. *Human Performance*, 15(4), 299-323.
- Regenbrecht, H. & Schubert, T. (2002). Real and illusory interactions enhance presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 425-434.
- Reiner, M. (2004). The role of haptics in immersive telecommunication environments. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 14(3), 392-401.
- Renaud, P., Chartier, S., Albert, G., Decaire, J., Cournoyer, L.-G. & Bouchard, S. (2007). Presence as determined by fractal perceptual-motor dynamics. *CyberPsychology & Behavior*, 10(1), 122-130.
- Retaux, X. (2003). Presence in the environment: Theories, methodologies and applications to video games. *PsychNology Journal*, 1(3), 283-309.
- Riley, J.M., Kaber, D.B. & Draper, J.V. (2004). Situation awareness and attention allocation measures for quantifying telepresence experiences in teleoperation. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 14(1), 51-67.
- Riva, G., Mantovani, F., Capdeville, C.S., Preziosa, A., Morganti, F., Villani, D., Gaggioli, A., Botella, C. & Alcaniz, M. (2007). Affective interactions using virtual reality: The link between presence and emotions. *CyberPsychology and Behavior*, 10(1), 45-56.
- Rockrohr, C. (1983). *Wörterbuch der Daten- und Telekommunikation*. Haar bei München: Verlag Markt & Technik.
- Rosenberg, L.B. (1993). The use of virtual fixtures to enhance telemanipulation with time delay. In H. Kazerooni, B.D. Adelstein & J.E. Colgate (Eds.). *Advances in Robotics, Mechatronics and Haptic Interfaces, ASME Winter Annual Meeting, DSC 49*, 29-36.
- Rosenberg, L.B. & Adelstein, B.D. (1993). Perceptual decomposition of virtual haptic surfaces. *Proceedings of the IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*, 46-53.
- Rosenblum, L. & Macedonia, M. (2005). Tangible photorealistic virtual museum. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(1), 15-17.
- Rothenberg, M., Verrillo, R.T., Zahorian, S.A., Brachman, M.L. & Bolanowski Jr, S.J. (1977). Vibrotactile frequency for encoding a speech parameter. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(4), 1003-1012.
- Royer, F.L. (1981). Detection of symmetry. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1186-1210.
- Russo, T. C. (2001). Operationalizing mediated presence: Initial Steps toward a measure of the construct. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Sacau, A., Gouveia, L.M.B., Ribeiro, N.M., Gouveia, F.R. & Biocca, F. (2003). Presence in computer-mediated environments: A short review of the main concepts, theories, and trends. *Proceedings of the IADIS International Conference e-Society*, 2003.
- Sacau, A. Laarni, J., Ravaja, N. & Hartmann, T. (2005). The impact of personality factors on the experience of spatial presence. *Proceedings of the 8th Annual International Workshop on Presence*, 2005, 143-151.

- Sadowski, W. & Stanney, K. (2002a). Presence in virtual environments. In K. Stanney (Ed.). *Handbook of Virtual Environments*, pp. 791-806. New York: Erlbaum.
- Sadowski, W. & Stanney, K. (2002b). Measuring and managing presence in virtual environments. In K. Stanney (Ed.). *Handbook of Virtual Environments*, chapt. 45. New York: Erlbaum.
- Sallnäss, E.-L., Rasmus-Gröhn, K. & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(4), 461-476.
- Sano, A. & Tsuji, H. (1993). Optimal sampling rate for impulse response identification based on decimation and interpolation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'93)*, 4(7687), 460-463.
- Sansone, C. & Harackiewicz, J.M (2000). *Intrinsic and Extrinsic Motivation: The Search for Optimal Motivation and Performance*. San Diego: Academic Press.
- Sas, C. & O'Hare, G. (2001). The presence equation: An investigation into cognitive factors underlying presence. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Sas, C. & O'Hare, G.M.P. (2003). Presence equation: An investigation into cognitive factors underlying presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 523-537.
- Sas, C., O'Hare, G.M.P. & Reilly, R. (2004). Presence and task performance: An approach in the light of cognitive style. *Cognition, Technology and Work*, 6, 53-56.
- Scheuchpflug, R. (2001). Measuring presence in virtual environments. In M.J. Smith, G. Salvendy, & M.R. Kasdorf (Eds.). *HCI International 2001*, pp. 56-58. New Orleans: HCI International.
- Schloerb, D.W. (1995). A quantitative measure of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4(1), 64-80.
- Schmidt, R.F. (1973). *Grundriß der Sinnesphysiologie*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schneider, W. & Shiffrin, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Scholz, G. & Schuler, H. (1993). Das nomologische Netzwerk des Assessment Centers: Eine Metaanalyse. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, 37, 73-85.
- Schubert, T., Friedmann, F. & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analysis insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266-281.
- 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.
- Schuler, H. & Prochaska, M. (2001). *Leistungsmotivationsinventar*. Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Senders, J. W., Christensen, J. M., & Sabeh, R. (1955). Comparison of single operator's performance with team performance in a tracking task. *Report TN-55-362*. Aero Medical Laboratory, Wright Air Development Center.
- Selverian, M.M. & Hwang, H.S. (2003). In search of presence: A systematic evaluation of evolving VLEs. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 512-522.
- Semmlow, J., Gauthier, G. & Vercher, J.-L. (1990). Identification of peripheral visual images in a laterally restricted gaze field. *Perceptual and Motor Skills*, 70, 175-194.
- SensAble Technologies Inc. (2000). *SKD GHOST API Reference* [Computer Software]. Woburn, MA: SensAble Technologies.
- Seow, K. (1988). Physiology of touch, grip and gait. In J. Webster (Ed.). *Tactile Sensing for Robotics and Medicine*, pp. 13-40. New York: John Wiley & Sons, Inc..

- Shahabi, C., Ortega, A. & Kolahdouzan, M.R. (2002). A comparison of different haptic compression techniques. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME'02)*, 1, 657-660.
- Shannon, C.E. (1949; Nachdruck 1998). Communications in the presence of noise. *Proceedings of the IEEE*, 86(2), 1998.
- Shannon, C.E. & Weaver, W. (1976). *Mathematische Grundlagen der Informationstheorie*. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH.
- Sharpe, J.E.E. (1978). Application of bond graphs to the synthesis and analysis of telechirics and robots. In A. Morecki, G. Bianchi & K. Kedzior (Eds.). *Proceedings of the 3rd Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pp. 217-227. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Sharpe, J.E.E. (1988). Technical and human operational requirements for skill transfer in teleoperations. *Proceedings of the International Symposium on Teleoperation and Control*, 1988, 175-187.
- Sheridan, T.B. (1992a). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Sheridan, T.B. (1992b). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 120-125.
- Sheridan, T.B. (1993). Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5), 592-606.
- Sheridan, T.B. (1994). Further Musings on the psychophysics of presence. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2, 1073-1077.
- Sheridan, T.B. (1999). Descartes, Heidegger, Gibson, and God: Toward an eclectic ontology of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 551-559.
- Sheridan, T.B. (2001). Response to "Building a bridge between different scientific communities: On Sheridan's eclectic ontology of presence". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(5), 544-545.
- Sheridan, T.B. & Ferrell, W.R. (1963). Remote manipulative control with transmission delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 25-29.
- Sherrick, C.E. (1953). Variables affecting the sensitivity of the human skin to mechanical vibration. *Journal of Experimental Psychology*, 4, 273-282.
- Sherrick, C.E. (1964). Effects of multiple simultaneous stimulation of the skin. *American Journal of Psychology*, LXXVII, 42-53.
- Sherrick, C.E. & Craig, J.C. (1982). The psychophysics of touch. In W. Schiff & E. Foulke (Eds.). *Tactual Perception: A Sourcebook*, pp. 55-81. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shiffrin, R.M. & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.
- Shimoga, K.B. (1993a). A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation: Part I. Finger force feedback. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, 263-270.
- Shimoga, K.B. (1993b). A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation: Part II. Finger touch feedback. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, 271-279.
- Simon, J.R. (1990). The effects of an irrelevant directional cue on human information processing. *Advances in Psychology*, 65(8), 31-86.
- Sinclair, R.J. & Burton, H. (1996). Discrimination of vibrotactile frequencies in a delayed pair comparison task. *Perception & Psychophysics*, 58(5), 680-692.

- Slater, M. (1999). Measuring presence: A response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560-565.
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M. & Kooper, R. (1996). Immersion, presence, and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess. *Proceedings of the ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST'96)*, 163-172.
- Slater, M., Sadagic, A., Usoh, M. & Schroeder, R. (2000). Small-group behavior in a virtual and real environment: A comparative study. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(1), 37-51.
- Slater, M. & Steed, A. (2000). A virtual presence counter. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 413-434.
- Slater, M., Steed, A., McCarthy, J. & Maringelli, F. (1998). The influence of body movement on subjective presence in virtual environments. *Human Factors*, 40(3), 469-477.
- Slater, M. & Usoh, M. (1993a). Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2(3), 221-233.
- Slater, M. & Usoh, M. (1993b). Presence in immersive virtual environments. *IEEE Annual International Symposium on Virtual Reality*, 90-96.
- Slater & Usoh (1993c). *An Experimental Exploration of Presence in Virtual Environments*. London: QMW University, Department of Computer Science.
- Slater, M., Usoh, M. & Chrysanthou, Y. (1995). The influence of dynamic shadows on presence in immersive virtual environments. In M. Gobel (Ed.). *Virtual Environments 95. Selected Papers of the Eurographics Workshops*, pp. 8-21.
- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 130-144.
- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A. (1995). Taking Steps: The influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human-Interaction*, 2(3), 201-219.
- 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(6), 603-616.
- Snow, M.P. & Williges, R.C. (1998). Empirical models based on free-modulus magnitude estimation of perceived presence in virtual environments. *Human Factors*, 40(3), 386-402.
- Solomonow, M. & Conaway, C. (1983). Plasticity in electrotactile frequency discrimination. *Proceedings of the IEEE Frontiers of Engineering and Computing in Health Care Conference*, 570-574.
- Spence, C. & Driver, J. (1997). Cross-modal links in attention between audition, vision, and touch: Implications for interface design. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 1, 351-373.
- Spence, C. & Driver, J. (2004). *Crossmodal Space and Crossmodal Attention*. Oxford: Oxford University Press.
- Srinivasan, M.A., Beauregard, G.L. & Brock, D.L. (1996). The impact of visual information on haptic perception of stiffness in virtual environments. *ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.58*, 555-559.
- Srinivasan, M.A. & Chen, J.-S. (1993). Human performance in controlling normal forces of contact with rigid objects. *ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC 49*, 119-125.
- Stanney, K.M., Kennedy, R.S., Drexler, J.M. & Harm, D.L. (1999). Motion sickness and proprioceptive aftereffects following virtual environment exposure. *Applied ergonomics*, 30, 27-38.
- Stanney, K.M., Kingdon, K.S., Graeber, D. & Kennedy, R.S. (2002). Human performance in immersive virtual environments: Effects of exposure duration, user control, and scene complexity. *Human Performance*, 15(4), 339-366.

- Stanney, K.M., Mourant, R.R. & Kennedy, R.S. (1998). Human factors issues in virtual environments: A review of the literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4), 327-351.
- Stanney, K. & Salvendy, G. (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.
- Stark, L., Kim W.-S., Tendick, F., Hannaford, B., Ellis, S., Denome, M., Duffy, M., Hayes, T., Jordan, T., Lawton, M., Mills, T., Peterson, R., Sanders, K., Tyler, M. & van Dyke, S. (1987). Telerobotics: Display, control, and communication problems. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(1), 67-75.
- Steinbuch, K. (1977). *Kommunikationstechnik*. Berlin: Springer-Verlag.
- Steinmetz, M.A., Romo, R. & Mountcastle, V.B. (1989). Cortical neuronal mechanisms for frequency discrimination in the somesthetic sense of flutter. In O. Franzén & J. Westman (Eds.). *Information Processing in the Somatosensory System*, pp. 289-303. New York: Stockton Press.
- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73-93.
- Steuer, J. (1995). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. In F. Biocca & M.R. Levy (Eds.). *Communication in the age of virtual reality*, pp. 33-56. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Stevens, S.S. & Harris, J.R. (1962). The scaling of subjective roughness and smoothness. *Journal of Experimental Psychology*, 64, 489-494.
- Stone, R.J. (2001). Haptic feedback: A brief history from telepresence to virtual reality. In S. Brewster & R. Murray-Smith (Eds.). *Haptic HCI, LNCS 2058*, pp. 1-16. Berlin: Springer-Verlag.
- Styles, E.A. (1997). *The Psychology of Attention*. Sussex: Taylor & Francis.
- Sutcliffe, A., Gault, B. & Shin, J.-E. (2005). Presence, memory and interaction in virtual environments. *International Journal on Human-Computer Studies*, 62, 307-327.
- Tan, H.Z., Adelstein, B.D., Traylor, R., Kocsis, M. & Hileman, E.D. (2006). Discrimination of real and virtual high-definition textured surfaces. *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 3-9.
- Tan, H.Z., Barbagli, F., Salisbury, K., Ho, C. & Spence, C. (2006). Force-direction discrimination is not influenced by reference force direction. *Haptics-e*, 2006.
- Tan, H.Z., Durlach, N.I., Shao, Y. & Wei, M. (1993). Manual resolution when work and force cues are minimized. In H. Kazerooni, J.E. Colgate & B.D. Adelstein (Eds.). *ASME, DSC-49*, 99-104.
- Tan, H.Z., Pang, Z.D. & Durlach, N.I. (1992). Manual resolution of length, force, and compliance. In H. Kazerooni (Ed.). *Advances in Robotics, DSC-Vol. 42(ASME C)*, 13-18.
- Tan, H.Z., Srinivasan, M.A., Eberman, B. & Cheng, B. (1994). Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces. *Proceedings of the 3rd Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, ASME/IMECE, DSC: 55-1*, 353-359.
- Tang, W.K., Wong, T.T. & Heng, P.A. (2005). A system for real-time panorama generation and display in tele-immersive applications. *IEEE Transactions on Multimedia*, 7(2), 280-292.
- Taylor, M.M., Lederman, S.J. & Gibson, R.H. (1973). Tactual perception of texture. In E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.). *Handbook of Perception*, pp. 251-271. California, N.Y.: Academic Press.
- Thompson, D.A. (1977). The development of a six degree-of-constraint robot performance evaluation test. *13th Annual Conference on Manual Control*, 289-292.
- Timmins, L.R. & Lombard, M. (2005). When "real" seems mediated: Inverse presence. *Presence: Teleoperators*

- and *Virtual Environments*, 14(4), 492-500.
- Treisman, A.M. (1960). Verbal cues, language, and meaning in selective attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12, 242-248.
- Treisman, A. (1987). Properties, parts, and objects. In K.R. Boff, L. Kaufman & F.P. Thomas (Eds.). *Handbook of Perception and Human Performance*, chapt. 35. New York: Wiley and Sons.
- Treisman, A. (1993). The perception of features and objects. In A. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.). *Attention: Selection, awareness, and control*, pp. 5-34. Oxford: Clarendon.
- Treisman, A. & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Treutwein, B. (1995). Adaptive psychophysical procedures: Minireview. *Vision Research*, 35(17), 2503-2522.
- Tuller, B., Fitch, H.L. & Turvey, M.T. (1982). The Bernstein perspective II. The concept of muscle linkage or coordinative structure. In J.A.S. Kelso (Ed.). *Human Motor Behavior*, pp. 253-270. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Turvey, M.T., Fitch, H.L. & Tuller, B. (1982). The Bernstein perspective I. The problems of degrees of freedom and context-conditioned variability. In J.A.S. Kelso (Ed.). *Human Motor Behavior*, pp. 239-252. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Tyler, C.W. (1983). Sensory processing of binocular disparity. In C.M. Schor & K.J. Ciuffreda (Eds.). *Vergence Eye Movements: Basic and Clinical Aspects*, pp. 199-295.. Boston: Butterworth.
- Ueberle, M., Mock, N. & Buss, M. (2007). Design, control, and evaluation of a hyper-redundant haptic interface. In M. Ferre, M. Buss, R. Aracil, C. Melchiorri & C. Balaguer (Eds.). *Advances in Telerobotics: Human System Interfaces, Control, and Applications*. Berlin: Springer.
- Usuh, M., Catena, E., Arman, S. & Slater, M. (2000). Using presence questionnaires in reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 497-503.
- Van Doren, C.L. (1989). A model of spatiotemporal tactile sensitivity linking psychophysics to tissue mechanics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(5), 2065-2080.
- Van Doren, C.L., Pelli, D.G. & Verrillo, R.T. (1987). A device for measuring tactile spatiotemporal sensitivity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 81(6), 1906-1916.
- Verrillo, R.T. (1962). Investigations of some parameters of the cutaneous threshold for vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 1768-1773.
- Verrillo, R.T. (1963). Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(12), 1962-1966.
- Verrillo, R.T. (1965). Temporal summation in vibrotactile sensitivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(5), 843-846.
- Verrillo, R.T. (1966). Vibrotactile thresholds for hairy skin. *Journal of Experimental Psychology*, 72(1), 47-50.
- Verrillo, R.T., Fraioli, A.J. & Smith, R.L. (1969). Sensation magnitude of vibrotactile stimuli. *Perception and Psychophysics*, 6(6A), 366-372.
- Verrillo, R.T. & Smith, R.L. (1976). Effect of stimulus duration on vibrotactile sensation magnitude. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8(2), 112-114.
- Vitello, M., Wing, A. & Hartwig, V. (2006). *Exploration of new haptic illusions*. Work Package WP5, TOUCH-HapSys. (Available at: <http://www.touch-hapsys.org> [20.12.2007])
- Vogels, I.M.L.C. (2004). Detection of temporal delays in visual-haptic interfaces. *Human Factors*, 46(1), 118-134.

- Vogels, R. & Orban, G.A. (1987) Illusory contour orientation discrimination. *Vision Research*, 27, 453-467.
- Wagner, C.R. & Howe, R.D. (2005). Mechanisms of performance enhancement with force feedback. *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC 2005)*, 21-29.
- Wagner, C.R., Stylopoulos, N. & Howe, R.D. (2002). The role of force feedback in surgery: Analysis of blunt dissection. *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*, 68-74.
- Wall, S.A. & Harwin, W.S. (2000). Effects of physical bandwidth on perception of virtual gratings. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division (Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperators)*, DSC 69-2, 1033-1039.
- Waller, D. (1999). Factors affecting the perception of interobject distances in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(6), 657-670.
- Wandmacher, J. (1993). *Software-Ergonomie*. Berlin: de Gruyter
- Wang, D., Tuer, K., Rossi, M., Ni, L. & Shu, J. (2003). The effect of time delays on tele-haptics. *Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and their Applications (HAVE 2003)*, 7-12.
- Ware, C. & Rose, J. (1999). Rotating virtual objects with real handles. *Computer-Human Interaction*, 6(2), 162-180.
- Waterworth, J.A. & Waterworth, E.L. (2003). Being and time: Judged presence and duration as a function of media form. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 495-511.
- Waterworth, E., Waterworth, J., Holmgren, J., Rimbark, T. & Lauria, R. (2001). The illusion of being present: Using the interactive tent to create immersive experiences. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Watson, B., Walker, N., Ribarsky, W. & Spaulding, V. (1998). Effects of variation in system responsiveness on user performance in virtual environments. *Human Factors*, 40(3), 403-414.
- Watson, B., Walker, N., Woytiuk, P. & Ribarsky, W. (2003). Maintaining usability during 3D placement despite delay. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality (VR'03)*, 133-140.
- Weber, E.H. (1846). Der Tastsinn und das Gemeingefühl. In R. Wagner (Hrsg.). *Handwörterbuch der Physiologie, Bd. III/2*. Braunschweig: Vieweg.
- Weinert, A.B. (1998). *Organisationspsychologie* (4. Aufl.). Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Weisenberger, J.M., Krier, M.J. & Rinker, M.A. (2000). Judging the orientation of sinusoidal and square-wave virtual gratings presented via 2-DOF and 3-DOF haptic interfaces. *Haptics-e*, 1(4), 1-20. (available at <http://www.haptics-e.org> [23.05.2005])
- Weissmahr, B. (1991). *Ontologie* (2. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.
- Weitz, J. (1941). Effect of temperature on sensitivity of the finger. *Journal of Experimental Psychology*, 28, 21-36.
- Welch, R.B. (1999). How can we determine if the sense of presence affects task performance? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 574-577.
- Welch, R.B., Blackmon, T.T., Liu, A., Mellers, B.A. & Stark, L.W. (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.
- Welch, R.B. & Warren, D.H. (1986). Intersensory interactions. In K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (Eds.). *Handbook of Perception and Human Performance. Vol. 1: Sensory Processes and Perception*, chapt. 25.

- New York: Wiley & Sons.
- Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II. *Psychologische Forschung*, 4, 301-350.
- Whalen, T.E., Noel, S. & Stewart, J. (2003). Measuring the human side of virtual reality. *International Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurement Systems (VECIMS 2003)*, 8-11.
- Whitelock, D., Romano, D., Jelfs, A. & Brna, P. (2000). Perfect presence: What does this mean for the design of virtual learning environments? *Education and Information Technologies*, 5(4), 277-289.
- Willemsen, P. & Gooch, A. (2002). An experimental comparison of perceived egocentric distance in real, image-based, and traditional virtual environments using direct walking tasks. *Technical Report UUUCS-02-009*, School of Computing, University of Utah.
- Wilska, A. (1954). On the vibrational sensitivity in different regions of the body surface. *Acta Psychologica Scandinavica*, 31, 285-289.
- Witmer, B.G. & Kline, P.B. (1998). Judging perceived and traversed distance in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7, 144-167.
- Witmer, B.G. & Singer, M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240.
- Woodworth, R.S. & Schlosberg, H. (1954). *Experimental psychology*. London: Methuen.
- Youngblut, C. & Huie, O. (2003). The relationship between presence and performance in virtual environments: Results of a VERTS study. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2003 (VR'03)*, 2003.
- Zahorik, P. & Jenison, R.L. (1998). Presence as being-in-the-world. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1), 78-89.
- Zelaznik, H.N., Mone, S., McCabe, G.P. & Thaman, C. (1988). Role of temporal and spatial precision in determining the nature of speed-accuracy trade-off in aimed-hand movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 221-230.
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 127-132.
- Zhai, S. & Milgram, P. (1998). Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6 DOF input devices. *CHI 1998: Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1998, 320-327.
- Zhai, S. & Senders, J. W. (1997a). Investigating coordination in multidegree of freedom control I: Time-on-target analysis of 6 DOF tracking. *Proceedings of 41st Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society*, 1249-1254.
- Zhai, S. & Senders, J. W. (1997b). Investigating coordination in multidegree of freedom control II: Correlation analysis in 6 DOF tracking. *Proceedings of 41st Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society*, 1254-1258.
- Zhao, S. (2001). Toward a taxonomy of copresence. *Proceedings of the 4th Annual International Workshop on Presence*, 2001.
- Zimmons, P. & Panter, A. (2003). The influence of rendering quality on presence and task performance in a virtual environment. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality (VR'03)*, 2003.

Anhang A: Der Fragebogen von Scheuchenpflug (2001)

Der Präsenzfragebogen von Scheuchenpflug (2001) besteht aus 51 Items. Items 1 bis 15 und 28 bis 51 messen das Präsenzkonstrukt. Die Fragen zur immersiven Tendenz stecken in den Items 16 bis 27.

Eine Faktorenanalyse identifizierte für das Präsenzkonstrukt drei Subskalen, die als räumliche Präsenz, Qualität der Schnittstelle und Involvierung und Motivation interpretiert werden können. Für die Persönlichkeitseigenschaft immersive Tendenz ergaben sich zwei Subskalen: emotionale Involvierung und Grad der Involvierung.

Die Werte auf den Subskalen werden durch einfache Addition der Item-Ratings ermittelt. Für diesen Score werden jedoch nur Items, die höher als 0.40 auf den VARIMAX-Faktoren laden, verwendet (Scheuchenpflug, 2005, persönliche Kommunikation). In der Tabelle A.01 werden die Mittelwerte, die Standardabweichungen und der Wertebereich für die einzelnen Skalen der Eichstichprobe (n = 165) angegeben.

TABELLE A.01. Mittelwerte, Standardabweichungen und Wertebereiche für die einzelnen Subskalen aus der Eichstichprobe.

Skala	Subskala	Mittelwert	Standardabweichung	Itemanzahl	Wertebereich
Präsenz	Räumliche Präsenz	R 48.06	18.26	14	14-98
	Qualität der Schnittstelle	Q 56.81	8.84	11	11-77
	Involvierung und Motivation	M 27.52	5.78	6	6-42
Immersionale Tendenz	Emotionale Involvierung	E 22.87	6.27	6	6-42
	Grad der Involvierung	G 18.70	5.59	5	5-35

Im Folgenden wird der Fragebogen von Scheuchenpflug (2001) vollständig wiedergegeben. Dabei werden die Items, die eine höhere Ladung als 0.40 aufweisen und deren Zugehörigkeit zu der jeweiligen Subskala markiert. Für das Präsenzkonstrukt wird eine farbliche Kodierung in grün vorgenommen, für die immersive Tendenz in orange. Beim Präsenzkonstrukt wird die Subskala räumliche Präsenz mit einem **R**, die Subskala Qualität der Schnittstelle mit einem **Q** und die Subskala Involvierung und Motivation mit einem **M** gekennzeichnet. Für die Subskalen der immersiven Tendenz werden für die emotionale Involvierung ein **E** und für den Grad der Involvierung ein **G** angegeben.

Mehrere Items müssen bei dem Fragebogen von Scheuchenpflug umkodiert werden, so dass hohe Ratings auch einen hohen Grad an Präsenz bedeuten. Die Notwendigkeit der Umkodierung wird mit einem **U** angezeigt.

Fragebogen zu Presence und Immersive Tendenz in virtuellen Realitäten

Die folgenden Fragen erkundigen sich nach der Qualität Ihres Erlebnis einer virtuellen Realität. Abhängig von der Technik, die zur Darstellung und Steuerung der virtuellen Umgebung benutzt wird sowie anderen Faktoren, erleben verschiedene Personen virtuelle Umgebungen als unterschiedlich realistisch. Dieser Fragebogen mißt den Einfluß verschiedener Faktoren auf Ihr Erleben der virtuellen Umgebung.

Bitte denken Sie bei der Beantwortung der Fragen an alle Aufgaben, die Sie während des gesamten Experiments durchlaufen haben.

Beispiel:

Wenn Sie das Gefühl hatten, dass Sie sich in der virtuellen Umgebung sehr natürlich bewegen und verhalten konnten, dann kreuzen Sie bitte bei Frage 1 das Feld ganz links an.

Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?

1X	2	3	4	5	6	7
sehr natürlich			weder noch			sehr unnatürlich

Wenn Sie das Gefühl hatten, dass Sie sich in der virtuellen Umgebung eher unnatürlich bewegen und verhalten konnten, dann kreuzen Sie bitte die 5 an.

Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?

1	2	3	4	5 X	6	7
sehr natürlich			weder noch			sehr unnatürlich

- Q U** 1. Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------|---|---|------------|---|---|------------------|
| sehr natürlich | | | weder noch | | | sehr unnatürlich |
- Q U** 2. Wie stark trug das, was Sie gesehen haben, dazu bei, daß Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|---|---|------------|---|---|------------|
| sehr stark | | | weder noch | | | sehr wenig |
- Q U** 3. Wie stark trug das, was Sie gehört haben, dazu bei, daß Sie sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlten?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|---|---|------------|---|---|------------|
| sehr stark | | | weder noch | | | sehr wenig |
- Q U** 4. Wie natürlich erschien Ihnen der Mechanismus, der die Bewegung in der Umgebung kontrollierte?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------|---|---|------------|---|---|------------------|
| sehr natürlich | | | weder noch | | | sehr unnatürlich |
- Q M U** 5. Wie überzeugend war Ihr Eindruck von sich im virtuellen Raum bewegenden Objekten?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|---|---|------------|---|---|-------------------|
| sehr überzeugend | | | weder noch | | | nicht überzeugend |
- U** 6. Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|---|---|------------|---|---|------------|
| sehr stark | | | weder noch | | | sehr wenig |
- U** 7. Wie gut konnten Sie vorhersehen, was als Reaktion auf Ihre Handlungen folgen würde?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|---------------|
| sehr gut | | | weder noch | | | sehr schlecht |
- Q U** 8. Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung visuell zu überblicken oder zu untersuchen?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|---------------|
| sehr gut | | | weder noch | | | sehr schlecht |
- M U** 9. Wie real erschienen Ihnen Ihre Bewegungen durch den virtuellen Raum?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|---|---|------------|---|---|-------------|
| sehr real | | | weder noch | | | sehr unreal |
- M U** 10. Wie genau konnten Sie Objekte untersuchen?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|---|---|------------|---|---|--------------|
| sehr genau | | | weder noch | | | sehr ungenau |
- M U** 11. Wie gut konnten Sie Objekte in der virtuellen Realität bewegen oder manipulieren?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|---------------|
| sehr gut | | | weder noch | | | sehr schlecht |

- Q U** 12. Wie stark fühlten Sie sich in die virtuelle Realität hineinversetzt?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|---|---|------------|---|---|------------|
| sehr stark | | | weder noch | | | sehr wenig |
- Q U** 13. Wie groß war die Verzögerung zwischen Ihren Aktionen und den erwarteten Reaktionen?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|---|---|------------|---|---|------------|
| sehr groß | | | weder noch | | | sehr klein |
- Q U** 14. Wie schnell gewöhnten Sie sich an die virtuelle Umgebung?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------|---|---|------------|---|---|--------------|
| sehr schnell | | | weder noch | | | sehr langsam |
- Q U** 15. Konnten Sie sich eher auf die Ausführung Ihrer Aufgaben konzentrieren oder mußten Sie sich eher auf die Bedienelemente konzentrieren?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------|---|---|------------|---|---|---------------------|
| eher Aufgabe | | | weder noch | | | eher Bedienelemente |

Mit den folgenden Fragen soll ermittelt werden, wie stark Sie sich im Allgemeinen in Ereignisse hineinversetzen (immersive tendency).

- G** 16. Lassen Sie sich leicht tief in Spiel- oder Fernsehfilme hineinziehen?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------|---|---|------------|---|---|----|
| Nein | | | weder noch | | | Ja |
- G** 17. Sind Sie manchmal so sehr in eine Fernsehsendung oder in ein Buch vertieft, daß andere Menschen nur schwer Ihre Aufmerksamkeit auf sich ziehen können?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|---|---|------------|---|---|----------|
| nie | | | weder noch | | | sehr oft |
18. Waren Sie jemals so sehr in einen Film vertieft, daß Ihnen die Dinge, die um Sie herum passierten, nicht mehr bewußt waren?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|---|---|------------|---|---|--------------|
| Nein, nie | | | weder noch | | | Ja, sehr oft |
- G** 19. Wie oft identifizieren Sie sich stark mit den Charakteren einer Geschichte?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|---|---|------------|---|---|----------|
| nie | | | weder noch | | | sehr oft |
- G** 20. Fühlten Sie sich jemals so sehr in ein Computerspiel verwickelt, daß Sie eher das Gefühl hatten, Sie seien Teil des Spiels, als daß Sie nur einen Joystick bewegen und einen Bildschirm beobachten?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|---|---|------------|---|---|--------------|
| Nein, nie | | | weder noch | | | Ja, sehr oft |
- G** 21. Wenn sie sich Sportübertragungen ansehen: Sind Sie bisweilen so sehr in ein Spiel vertieft, daß Sie wie einer der Spieler handeln?
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|---|---|------------|---|---|--------------|
| Nein, nie | | | weder noch | | | Ja, sehr oft |

E 22. Werden Sie manchmal so sehr in einen Tagtraum hineingezogen, daß Sie sich der Dinge um Sie herum nicht mehr bewußt sind?

1	2	3	4	5	6	7
Nein, nie			weder noch			Ja, sehr oft

E 23. Haben Sie manchmal Träume, die so real sind, daß Sie sich beim Erwachen desorientiert fühlen?

1	2	3	4	5	6	7
Nein, nie			weder noch			Ja, sehr oft

E 24. Hat jemals eine Jagd- oder Kampfszene in Film oder Fernsehen Aufregung bei Ihnen ausgelöst?

1	2	3	4	5	6	7
Nein, nie			weder noch			Ja, sehr oft

E 25. Hat Sie jemals etwas in einer Fernsehsendung oder in einem Spielfilm geängstigt?

1	2	3	4	5	6	7
Nein, nie			weder noch			Ja, sehr oft

E 26. Ist es Ihnen jemals passiert, daß Sie nach einem beängstigenden Film lange Zeit besorgt oder verängstigt waren?

1	2	3	4	5	6	7
Nein, nie			weder noch			Ja, sehr oft

E 27. Sind Sie manchmal so mit einer Sache beschäftigt, daß Sie die Zeit vergessen?

1	2	3	4	5	6	7
Nein, nie			weder noch			Ja, sehr oft

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie diesen Aussagen zustimmen oder sie ablehnen.

R 28. Die Simulation kam auf mich zu und erschuf mir eine neue Welt, die plötzlich verschwand, als die Simulation endete.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

R 29. Während der Simulation hatte ich das Gefühl, ich sei in der Welt, die die Simulation erschuf.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

R 30. Während der Simulation war mein Körper im Raum, mein Bewußtsein aber war in der Welt, die die Simulation erschuf.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

- R** 31. Während der Simulation war die durch sie erschaffene Welt realer oder präsenter als die reale Welt.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- U** 32. Die durch die Simulation erschaffene Welt war für mich eher „etwas, das ich sah“ als „ein Ort, den ich besuchte“.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R U** 33. Während der Simulation war mein Bewußtsein im realen Raum, nicht in der Welt, die die Simulation erschuf.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R** 34. Die virtuelle Welt erschien mir wirklicher als die reale Welt.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
35. Ich hatte das Gefühl, an einem Ort zu sein.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R U** 36. Ich hatte das Gefühl, nur Bilder zu sehen.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R** 37. Ich hatte das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R** 38. Ich vergaß, daß noch andere Personen im Raum anwesend waren.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R** 39. Ich fühlte mich in dem virtuellen Raum anwesend.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R** 40. Ich fühlte mich wie in einer anderen Welt.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
41. Ich konnte mir den virtuellen Raum vorstellen.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |
- R** 42. Ich hielt den virtuellen Raum für wirklich.
- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------------|---|---|-----------|
| lehne ab | | | weder noch | | | stimme zu |

U 43. Ich empfand die Situation als albern.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

R 44. Meine reale Umgebung war mir nicht mehr bewußt.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

45. Meine Kopfbewegungen folgten unwillkürlich den Bewegungen auf dem Display.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

46. Beim Auftreten von Geräuschen orientierte ich mich in die Richtung ihrer Herkunft.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

47. In gefährlichen Situationen fühlte ich mich tatsächlich bedroht.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

M 48. Mein Wille, die mir in der virtuellen Welt gestellten Aufgaben zu meistern, war so stark wie im realen Leben.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

M 49. Nachdem ich Aufgaben erfolgreich gemeistert hatte, fühlte ich mich erleichtert.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

R U 50. Das Eintauchen in die virtuelle Welt war für mich nur ein Spiel.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

Q U 51. Die Bedienelemente empfand ich als fremd und unrealistisch.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

Anhang B: Berechnung der Solltrajektorie einer Ellipsenbahn auf einer Kugeloberfläche

Für die Berechnung der Solltrajektorie wurde das Koordinatensystem, das in der Informatik gültig ist, zugrunde gelegt, da die ausgegebenen Koordinaten des PHANTOMs in diesem Koordinatensystem erfolgen. Die Abbildung B.01 stellt das zu berechnende Problem graphisch dar.

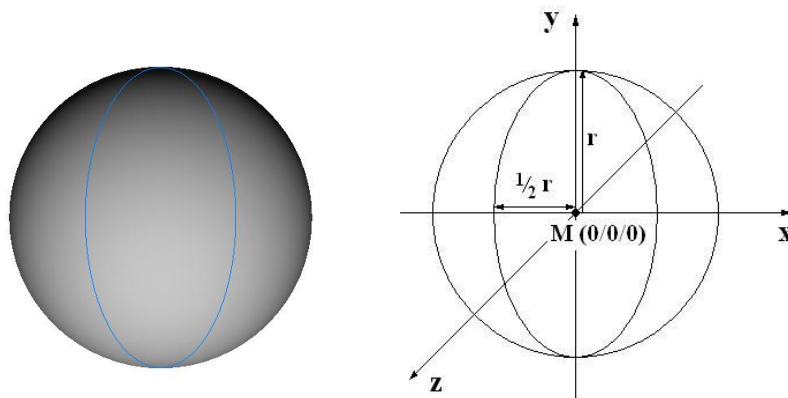


ABBILDUNG B.01. Skizze zur Berechnung der Solltrajektorie einer Ellipsenbahn auf einer Kugeloberfläche.

Dann gilt für die Darstellung von kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten:

$$x = r \cdot \sin(\Theta) \cdot \sin(\varphi)$$

$$y = r \cdot \cos(\Theta) \quad , \text{ wobei}$$

$$z = r \cdot \sin(\Theta) \cdot \cos(\varphi)$$

r den Radius einer Kugel;

Θ den Polarwinkel einer Kugel und

φ den Azimutwinkel einer Kugel darstellen.

Für die Berechnung der Solltrajektorie wird die Ellipsengleichung in die Kugelgleichung eingesetzt, um eine dreidimensionale Ellipsenbahn zu erhalten.

Eine Kugelgleichung kann beschrieben werden durch

$$K: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 ,$$

der Vektor (x_0, y_0, z_0) stellt die Mittelpunktkoordinaten der Kugel dar, im vorliegenden Fall $(0, 0, 0)$.

Die Ellipsengleichung lautet:

$$E: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ mit den Halbachsen } a = \frac{1}{2} r \text{ und } b = r.$$

Nach y aufgelöst ergibt sich die Gleichung $x = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2}$.

Somit lautet die spezielle Ellipsengleichung: $E: 4 \cdot \frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{r^2} = 1 \Leftrightarrow \frac{4x^2 + y^2}{r^2} = 1$.

Nach Einsetzen der Ellipsengleichung in die Kugelgleichung ergibt sich:

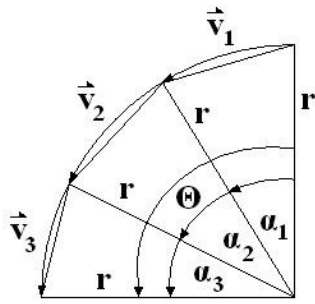
$$\begin{aligned} &\Rightarrow \left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2}\right)^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ &\Leftrightarrow \frac{1}{4} r^2 - \frac{1}{4} y^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ &\Leftrightarrow \frac{3}{4} y^2 + z^2 = \frac{3}{4} r^2 \\ &\Leftrightarrow z = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \end{aligned}$$

Somit ergibt sich der Sollvektor $\vec{r}_E = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix}$ zu $\vec{r}_E = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \\ y \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \end{pmatrix}$.

Setzt man für y die Kugelkoordinaten ein, erhält man den Sollvektor der Solltrajektorie der Ellipse in Abhängigkeit von Radius r und vom Polarwinkel Θ :

$$\vec{r}_E = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \\ y \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{r^2 - (r \cdot \cos(\Theta))^2} \\ r \cdot \cos(\Theta) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{r^2 - (r \cdot \cos(\Theta))^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{r^2 \cdot (1 - \cos^2(\Theta))} \\ r \cdot \cos(\Theta) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{r^2 \cdot (1 - \cos^2(\Theta))} \end{pmatrix}$$

Die Solltrajektorie der Ellipse bei einer quantisierten Kugeloberfläche wird durch ein Näherungsverfahren bestimmt, bei dem angenommen wird, dass der verfahrenere Geschwindigkeitsvektor \vec{v} ein Kreissegment einschließt. Die Abbildung B.02 stellt die wichtigsten Parameter dar.



Bogenelement :

$$\left| \frac{\mathbf{r}}{v} \right| = r \cdot \alpha$$

$$\Leftrightarrow \alpha = \frac{\left| \frac{\mathbf{r}}{v} \right|}{r}$$

$$\Theta = \sum_n \alpha_n = \frac{\left| \frac{\mathbf{r}}{v_n} \right|}{r_n}$$

ABBILDUNG B.02. Ausschnitt aus der Ellipsenbahn auf der Kugeloberfläche mit Geschwindigkeitsvektoren und eingeschlossenen Winkeln.

Der Polarwinkel Θ ist somit die Summe aller Winkel α , die durch die Bogenelemente aus Geschwindigkeitsvektor $\frac{\mathbf{r}}{v}$ und Radius r eingeschlossen werden und lässt sich durch die gemessenen Werte bestimmen. Aus den aufgezeichneten x -, y - und z -Koordinaten und aus dem aufgezeichneten Geschwindigkeitsvektor in x -, y - und z -Richtung lassen sich der Radius r und der Betrag des Geschwindigkeitsvektors $\frac{\mathbf{r}}{v}$ bestimmen:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \text{und} \quad \left| \frac{\mathbf{r}}{v} \right| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

Damit können entweder die Abweichungen in den einzelnen x -, y - und z -Komponenten Δ_n , also die einfache Differenz zwischen Ist- und Sollwert, oder die Gesamtabweichung von der Spur Δ_{ges} , also der Betrag des Vektors aus den Einzelkomponenten, berechnen:

$$\Delta_n = n_{Ist} - n_{Soll}, \quad \text{wobei } n = x, y, z$$

bzw.

$$\Delta_{ges} = \left| \frac{\mathbf{r}}{v_\Delta} \right| = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2}.$$

Anhang C: Der Adaptabilitätsfragebogen von Pongrac & Bongartz (2007)



Datum: _____

Alter: _____

Geschlecht: m w

VpNr.: _____

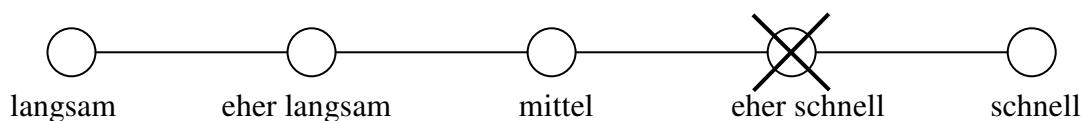
Hinweise zur Bearbeitung des Fragebogens:

Mit dem vorliegenden Fragebogen wird eine Persönlichkeitseigenschaft, genannt „Adaptabilität“ erfasst. Unter Adaptabilität versteht man die Tendenz einer Person, sich mehr oder weniger schnell an neue und unvertraute Umstände anzupassen. Dabei ist eine bestimmte Geschwindigkeit der Anpassung nicht als „besser“ oder „schlechter“ zu bezeichnen. Beide, eine schnelle und eine langsame Anpassung, haben ihre Vor- und Nachteile.

Im Folgenden werden Ihnen Situationen geschildert, die jeweils eine bestimmte Handlungsweise umfassen, z.B.:

„Den Umgang mit neuen technischen Geräten (z.B. ein neues Handy) erlernen.“

Bitte lesen Sie jede Schilderung genau durch und geben Sie an, mit welcher Geschwindigkeit die genannte Handlungsweise in der Regel auf Sie zutrifft. Dabei kreuzen Sie die zutreffende Geschwindigkeit bitte an.



Es kann vorkommen, dass Ihnen manche der geschilderten Situationen unbekannt sind. Dann versuchen Sie sich bitte vorzustellen, wie Sie in gegebenem Fall reagieren würden, denn es ist wichtig, dass alle Aussagen bearbeitet werden. Kreuzen Sie also die Geschwindigkeit an, die Ihrer Meinung nach auf Sie zutrifft.

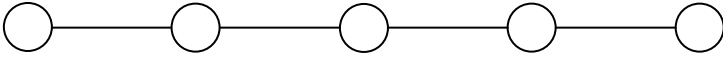
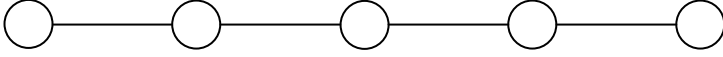

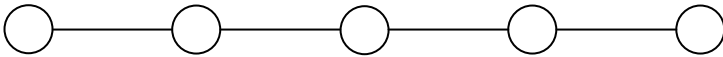
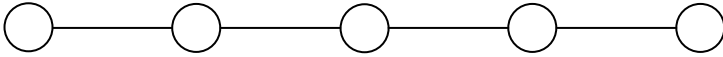
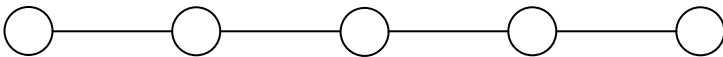
Bitte nehmen Sie die Markierungen stets eindeutig vor. Markierungen zwischen zwei Wörtern können nicht ausgewertet werden. Haben Sie versehentlich eine falsche Markierung vorgenommen, so kreisen Sie diese bitte ein und setzen Sie eine neue Markierung an einer anderen Stelle.

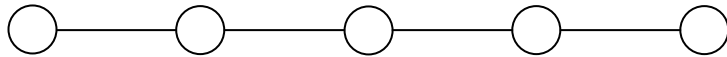
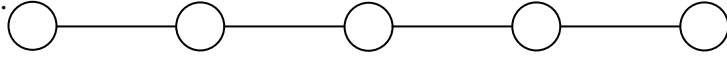
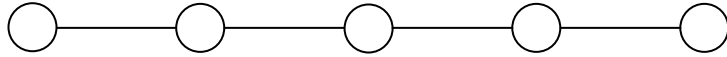
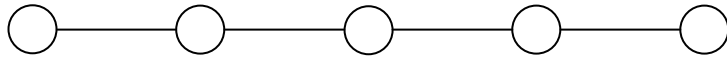
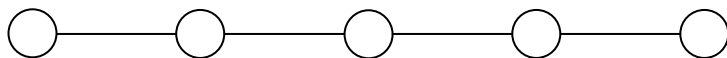
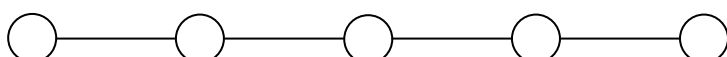
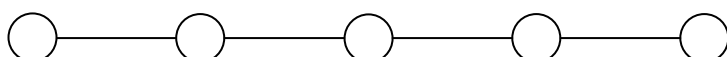
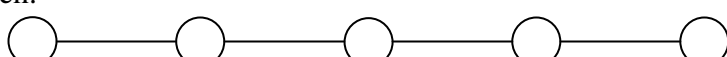
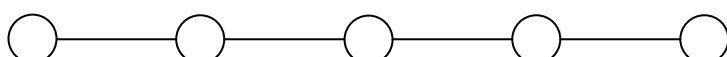
Bitte antworten Sie aufrichtig. Wie gesagt, es handelt sich nicht um einen Leistungstest, es gibt weder „richtige“ und „falsche“ noch „gute“ und „schlechte“ Antworten.

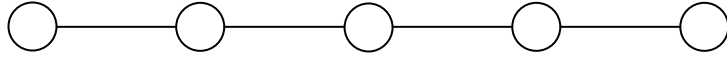
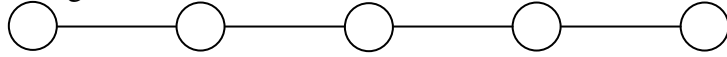
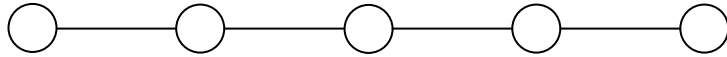
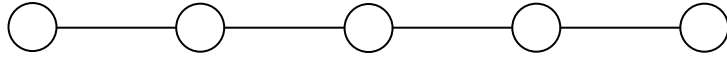
Wir sichern Ihnen zu, dass die in diesem Fragebogen erhobenen Daten lediglich für Forschungszwecke anonymisiert verwendet und streng vertraulich behandelt werden. Rückschlüsse auf die Identität des Ausfüllenden sind nicht möglich.

Vielen Dank, dass Sie sich für die Bearbeitung Zeit nehmen.

Bearbeiten Sie den Fragebogen nun bitte zügig, aber sorgfältig. Halten Sie sich nicht zu lange an einzelnen Aussagen auf.

	Korrelation Item – Gesamtscore	Quadrierte multiple Korrelation
In einer fremden Stadt das öffentliche Nahverkehrsnetz sicher nutzen.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.312	.624
Sich in eine Gruppe von Personen mit anderen Werten und Bräuchen integrieren.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.519	.542
Auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.194	.298
Sich an einen neuen Büroraum gewöhnen.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.149	.276
Sich in einer Gruppe von Personen mit anderen Werten und Bräuchen wohl fühlen.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.409	.497
Die Sichtweisen und Meinungen Anderer überdenken und verstehen.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.338	.279
Eigene Pläne an unerwartete Veränderungen anpassen.  langsam eher langsam mittel eher schnell schnell	.330	.291

In einer fremden Stadt das Verkehrsnetz durchschauen.	.359	.591
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Neue Vorgehensweisen und Methoden lernen, wenn es die Arbeit erfordert.	.259	.288
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Die Mentalität fremder Kulturen verstehen lernen.	.351	.411
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Die Stärken und Schwächen einer Person erkennen, um mit ihr angemessen umgehen zu können.	.335	.384
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Eigenständig Handeln, wenn über längere Zeit nicht alle wichtigen Fakten und Informationen zugänglich sind.	.364	.311
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Verhalten und Erscheinung ändern, um sich den Werten und Bräuchen Anderer anzupassen.	.295	.400
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Effektive Beziehungen zu Menschen aufbauen, die einem selbst sehr unähnlich sind.	.335	.292
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Notwendige Wege einleiten, um Wissen und Fähigkeiten aufrecht zu erhalten.	.311	.437
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Freundschaften mit Personen aus fremden Ländern schließen.	.195	.250
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		

Die Absichten und das Verhalten Anderer verstehen.	.446	.492
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
An Weiterbildungen teilnehmen, wenn Defizite in der Arbeitsleistung eintreten.	.303	.315
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Die Regeln für angemessene soziale Interaktion in anderen Kulturen lernen.	.493	.421
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		
Das eigene Verhalten an die Vorstellungen Anderer anpassen, um einen effektiven Umgang zu bewirken.	.227	.331
 langsam eher langsam mittel eher schnell schnell		

Anhang D: Instruktionen zur Induktion von hoher bzw. niedriger Involviertheit

1. Instruktion zur Induktion von hoher Involviertheit:



Instruktion

Worum geht es?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserem Versuch. Wie Sie bereits unserer Rundmail entnehmen konnten, interessieren wir uns für die Wahrnehmung von virtuellen Realitäten. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik und der Technischen Universität München arbeiten wir an virtuellen Trainingsprogrammen und befinden uns zur Zeit in der Endphase unseres Forschungsprojekts. Die ist eine letzte wichtige Untersuchung mit wenigen Versuchsteilnehmern, von welcher wir die letzten aussagekräftigen Ergebnisse bezüglich unserer Fragestellung erwarten.

Ihre Daten werden dabei anonym aufgezeichnet und ausgewertet und sind nach Berechnung der Statistik keiner Einzelperson mehr zuordenbar.

Was ist die Aufgabe?

Es wird gleich Ihre Aufgabe sein, einen Teil einer „Stadtmauer“ nachzubauen.

Sie werden auf dem Bildschirm in dreidimensionaler Form einzelne Bausteine der Stadtmauer in beliebiger Anordnung vorfinden, die Sie in die richtige Position bringen sollen. Sie können die Bausteine verschieben, drehen und hochheben, wenn Sie mit dem Phantom Kontakt zu dem jeweiligen Baustein herstellen und die **blaue Taste** drücken und halten. Die Steine sind nur dann manipulierbar, wenn Sie die blaue Taste gedrückt halten. Sie können die Steine so oft wie Sie möchten aufnehmen und wieder ablegen.

Die Bausteine untereinander haben dabei keinen fühlbaren Kontakt, versuchen Sie jedoch bitte, Überschneidungen zu vermeiden. Drücken Sie bitte die blaue Taste nur, wenn Sie sich mit dem Phantom-Cursor auf einer freien Oberfläche eines Bausteins befinden, also bitte nicht an den Schnittkanten zu anderen Bausteinen.

Wie läuft es ab?

Zunächst können Sie sich ein Bild der nachzubildenden Mauer ansehen. Sie finden das Bild in der Taskleiste unter „Sollzustand“. Bitte schauen Sie es sich genau an.

Während der Untersuchung können Sie sich das Bild zu jedem Zeitpunkt durch Klicken mit der Maus auf die Taskleiste auf „Sollzustand“ erneut ansehen. Sie dürfen das Bild so häufig aufrufen wie Sie es für nötig halten.

Wenn Sie der Meinung sind, dass Sie die Aufgabe beendet haben, d.h. wenn Sie glauben, dass Sie dem Sollzustand nahe genug gekommen sind, drücken Sie bitte die **„b“-Taste** auf der Tastatur (markiert mit einem grünen Punkt). Beantworten Sie dann bitte **eine Seite** des vor Ihnen liegenden Fragebogens. Dabei ist es wichtig, dass sie **erst die „b“-Taste drücken und dann den Fragebogen bearbeiten**, da sonst der Zeitzähler weiterläuft.

Danach bearbeiten Sie die nächste Aufgabe, indem Sie auf „Aufgabe starten“, das sie vor sich auf dem Desktop sehen, doppelklicken. Nach der Aufgabe beantworten Sie bitte erneut **eine Seite** des vor Ihnen liegenden Fragebogens, dann starten Sie bitte die nächste Aufgabe, usw. Sie machen also dieselbe Aufgabe mehrmals hintereinander. Die Ausgangsanordnung der einzelnen Bausteine verändert sich dabei nicht.

Bilden Sie die Mauer bitte so schnell und präzise wie möglich nach.

Ihre Mühe zahlt sich aus, denn für jeden Durchgang den Sie bearbeiten, erhalten Sie von uns zusätzlich zu den 15€ Entgelt einen Bonus von 0,50€. Vergessen Sie jedoch nicht die Präzision Ihrer Arbeit, wenn Sie die Mauer nachlässig nachbauen, erhalten Sie nicht den 0,50€-Bonus pro Durchgang. Überdies haben Sie die Möglichkeit am Ende der Sitzung eine Prämie in Höhe von 2€ für besonders hohe Präzision zu erhalten.

Was passiert zusätzlich?

Bei einigen Durchgängen öffnet sich während Ihrer Bearbeitung der Aufgabe ein Fenster. Sie werden aufgefordert, entweder eine Frage am Bildschirm zu beantworten oder den Zettel, der umgedreht neben dem Phantom liegt, zu bearbeiten. Ihre Aufgabe ist es dabei, eine Prozentschätzung abzugeben. Bitte bearbeiten Sie diese zusätzlichen Aufgaben (entweder mittels Tastatur bzw. mittels Kugelschreiber). Erst wenn Sie die Zusatzaufgabe erledigt haben, drücken Sie bitte die **„b“-Taste** auf der Tastatur (markiert mit einem grünen Punkt), um das zusätzliche Fenster zu schließen, und kehren Sie wieder zu Ihrer eigentlichen Aufgabe, die Stadtmauer nachzubauen, zurück.

Haben Sie dazu noch Fragen?

Beginnen Sie nun bitte mit der ersten Aufgabe; klicken Sie auf „Aufgabe starten“.

1. Instruktion zur Induktion von niedriger Involviertheit:

Instruktion

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserem Versuch. Wie Sie bereits unserer Rundmail entnehmen konnten, interessieren wir uns für die Wahrnehmung von virtuellen Realitäten. Dies ist eine Voruntersuchung, bei der wir eine große Anzahl von Versuchspersonen untersuchen.

Es wird gleich Ihre Aufgabe sein, einen Teil einer „Stadtmauer“ nachzubauen. Ihre Daten werden dabei anonym aufgezeichnet und ausgewertet und sind nach Berechnung der Statistik keiner Einzelperson mehr zuordenbar.

Sie werden auf dem Bildschirm in dreidimensionaler Form einzelne Bausteine der Stadtmauer in beliebiger Anordnung vorfinden, die Sie in die richtige Position bringen sollen. Sie können die Bausteine verschieben, drehen und hochheben, wenn Sie mit dem Phantom Kontakt zu dem jeweiligen Baustein herstellen und die **blaue Taste** drücken und halten. Die Steine sind nur dann manipulierbar, wenn Sie die blaue Taste gedrückt halten. Sie können die Steine so oft wie Sie möchten aufnehmen und wieder ablegen.

Die Bausteine untereinander haben dabei keinen fühlbaren Kontakt, versuchen Sie jedoch bitte, Überschneidungen zu vermeiden. Drücken Sie bitte die blaue Taste nur, wenn Sie sich mit dem Phantom-Cursor auf einer freien Oberfläche eines Bausteins befinden, also bitte nicht an den Schnittkanten zu anderen Bausteinen.

Zunächst können Sie sich ein Bild der nachzubildenden Mauer ansehen. Sie finden das Bild in der Taskleiste unter „Sollzustand“. Bitte schauen Sie es sich genau an.

Während der Untersuchung können Sie sich das Bild zu jedem Zeitpunkt durch Klicken mit der Maus auf die Taskleiste auf „Sollzustand“ erneut ansehen. Sie dürfen das Bild so häufig aufrufen wie Sie es für nötig halten.

Bilden Sie die Mauer bitte so schnell und präzise wie möglich nach. Wenn Sie der Meinung sind, dass Sie die Aufgabe beendet haben, d.h. wenn Sie glauben,

dass Sie dem Sollzustand nahe genug gekommen sind, drücken Sie bitte die **„b“-Taste** auf der Tastatur (markiert mit einem grünen Punkt).

Beantworten Sie dann bitte **eine Seite** des vor Ihnen liegenden Fragebogens.

Dabei ist es wichtig, dass sie **erst die „b“-Taste drücken und dann den Fragebogen bearbeiten**, da sonst der Zeitzähler weiterläuft.

Danach bearbeiten Sie die nächste Aufgabe, indem Sie auf „Aufgabe starten“, das sie vor sich auf dem Desktop sehen, doppelklicken. Nach der Aufgabe beantworten Sie bitte erneut **eine Seite** des vor Ihnen liegenden Fragebogens, dann starten Sie bitte die nächste Aufgabe, usw. Sie machen also dieselbe Aufgabe mehrmals hintereinander. Die Ausgangsanordnung der einzelnen Bausteine verändert sich dabei nicht.

Bei einigen Durchgängen öffnet sich während Ihrer Bearbeitung der Aufgabe ein Fenster. Sie werden aufgefordert, entweder eine Frage am Bildschirm zu beantworten oder den Zettel, der umgedreht neben dem Phantom liegt, zu bearbeiten. Ihre Aufgabe ist es dabei, eine Prozentschätzung abzugeben. Bitte bearbeiten Sie diese zusätzlichen Aufgaben (entweder mittels Tastatur bzw. mittels Kugelschreiber). Erst wenn Sie die Zusatzaufgabe erledigt haben, drücken Sie bitte die **„b“-Taste** auf der Tastatur (markiert mit einem grünen Punkt), um das zusätzliche Fenster zu schließen, und kehren Sie wieder zu Ihrer eigentlichen Aufgabe, die Stadtmauer nachzubauen, zurück.

Haben Sie dazu noch Fragen?

Beginnen Sie nun bitte mit der ersten Aufgabe; klicken Sie auf „Aufgabe starten“.

Anhang E: Screenshots für die Nebenaufgabe in der aktuellen Umgebung

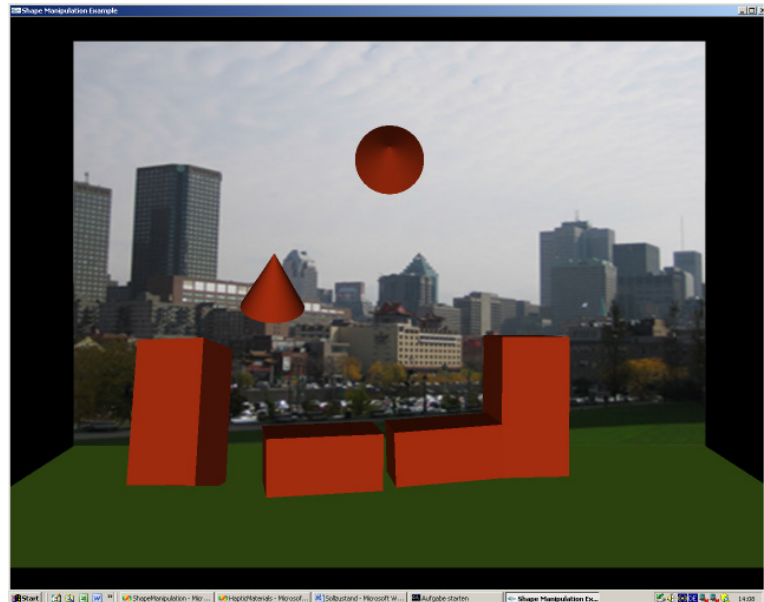
Bitte schätzen Sie ein, wie viel Prozent der Stadtmauer im nebenstehenden Bild schon nachgebaut wurde.

0% ist dabei die Ausgangskonfiguration, 100% ist die gemäß dem Sollzustand fertig gebaute Stadtmauer.

Welche Merkmale Sie dabei berücksichtigen, bleibt Ihnen überlassen.

Schätzung Prozentanteil:

Bitte kehren Sie jetzt wieder zu Ihrer Ursprungsaufgabe am Bildschirm zurück. Bevor Sie weitermachen, drücken Sie bitte die „enter“-Taste (markiert mit einem grünen Punkt).



Bitte schätzen Sie ein, wie viel Prozent der Stadtmauer im nebenstehenden Bild schon nachgebaut wurde.

0% ist dabei die Ausgangskonfiguration, 100% ist die gemäß dem Sollzustand fertig gebaute Stadtmauer.

Welche Merkmale Sie dabei berücksichtigen, bleibt Ihnen überlassen.

Schätzung Prozentanteil:

Bitte kehren Sie jetzt wieder zu Ihrer Ursprungsaufgabe am Bildschirm zurück. Bevor Sie weitermachen, drücken Sie bitte die „enter“-Taste (markiert mit einem grünen Punkt).

