

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

Telepräsenzsysteme
Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle

Dipl. Psych. Barbara Deml

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: Prof. Dr.-Ing. B. Katzy
Berichterstatter: Prof. Dr. B. Färber
Berichterstatter: Dr. rer. soc. Dr.-Ing. habil. M. Popp
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. / Univ. Tokio M. Buss

Diese Dissertation wurde am 26. Juni 2004 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 28. Juni 2004 angenommen.

Tag der Prüfung: 11. Oktober 2004

Inhaltsverzeichnis

Vorgehen und Zielsetzung.....	4
I Einführung und Anwendungsfelder.....	6
1 Montageroboter.....	7
2 Operationsroboter	8
3 Virtuelles Training.....	10
4 Virtuelle Produktentwicklung.....	11
5 Gemeinsame Aufgabenelemente	11
II Technischer Hintergrund.....	14
1 Haptische Eingabegeräte.....	14
1.1 Krafrückmeldende Systeme.....	15
1.2 Taktile Systeme.....	17
2 Optische Ausgabegeräte	19
3 Akustische Ausgabegeräte.....	21
4 Virtuelle Realität.....	23
III Gestaltungskriterien	27
1 Präsenzempfinden.....	27
2 Performanz.....	31
IV Gestaltungsaspekte	32
1 Differentialpsychologische Aspekte	32
1.1 Sensomotorische Fähigkeiten	33
1.2 Immersionsbereitschaft.....	35
1.3 Empirische Untersuchung.....	36
1.4 Zusammenfassung	40
2 Motorische Aspekte	41
2.1 Bewegungskoordination	41
2.2 Bewegungseffizienz.....	45
2.3 Empirische Untersuchung.....	49
2.4 Zusammenfassung	58

3	Sensomotorische Aspekte	60
3.1	Auge-Hand-Koordination	61
3.2	Hand-Hand-Koordination	64
3.3	Empirische Untersuchung	67
3.4	Zusammenfassung	74
4	Sensorische Aspekte	76
4.1	Sensorische Breite	76
4.2	Sensorische Tiefe	86
4.3	Empirische Untersuchung	88
4.4	Zusammenfassung	98
V	Gestaltungsempfehlungen	101
1	Heuristische Evaluation	101
2	PRESENCE – Design Guide	105
2.1	Aufgabenanalyse	106
2.2	Gestaltungsrichtlinien	108
2.3	Bewertung des Evaluationssystems	110
VI	Ausblick	111
	Abbildungsverzeichnis.....	113
	Tabellenverzeichnis.....	114
	Abkürzungsverzeichnis	115
	Literaturverzeichnis	116
	Anhang.....	141
A	Statistische Prüfgrößen	141
B	Berechnung der Bewegungskoordination/effizienz	146

Vorgehen und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Telepräsenzsysteme evaluiert und Richtlinien für die Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle abgeleitet (Abb. 1):

I. Dabei werden zunächst mit Montage- und Operationsrobotern prototypische Anwendungsfelder der Telemanipulation skizziert sowie mit dem virtuellen Training und der virtuellen Produktentwicklung zwei repräsentative Einsatzbereiche telepräsender virtueller Umgebungen aufgezeigt. Um im Folgenden eine Vergleichbarkeit zwischen den Aufgaben herstellen zu können und um möglichst allgemeingültige Gestaltungsaussagen abzuleiten, werden elementare Aufgabenelemente identifiziert, die den Anwendungen gemeinsam sind.

II. Telepräsenz Anwendungen erfordern ein anderes Interaktionskonzept als die bereits etablierten Benutzerschnittstellen der zweidimensionalen Mensch-Computer Interaktion. In einem Überblick werden geläufige, kommerziell verfügbare Eingabegeräte vorgestellt sowie relevante Gesichtspunkte der optischen und akustischen Displaytechnologie behandelt. Dabei werden auch grundlegende Aspekte virtueller Realitäten dargestellt.

III. Da die vorhandenen Ein- und Ausgabegeräte meist das Prototypenstadium noch nicht überwunden haben, liegen bislang kaum strukturierende Aussagen zur Schnittstellengestaltung vor. Um die Thematik möglichst umfassend zu bearbeiten, werden sowohl objektive als auch subjektive Gestaltungskriterien berücksichtigt und neben der Performance auch das Präsenzerleben der Anwender betrachtet.

IV. Ebenso werden sowohl differential- als auch allgemeinspsychologische Gestaltungsaspekte diskutiert: Zum einen gilt es, interindividuelle Unterschiede zwischen den Anwendern zu identifizieren, die für die Interaktion mit Telepräsenzsystemen bedeutsam sind; zum anderen erfordert eine effektive Schnittstellengestaltung die Funktionsweise des motorischen, sensomotorischen und sensorischen menschlichen Systems zu berücksichtigen. An die theoretische Analyse schließen sich experimentelle Untersuchungen an, in denen die Gestaltungsaussagen empirisch validiert werden.

V. Um die Entwicklung künftiger Telepräsenzsysteme zielgerichteter vornehmen zu können, werden die Ergebnisse in ein computergestütztes heuristisches Evaluationssys-

tem aggregiert. Fragebogengestützt können Experten mit dem ‚PRESENCE – Design Guide‘ unter anderem relevante Aufgaben-, System- und Benutzeraspekte analysieren und dann auf anwendungsspezifische Gestaltungsrichtlinien zugreifen.

I. Anwendungsfelder	II. Technischer Hintergrund
1. Montageroboter	1. Krafrückmeldende Eingabegeräte
2. Operationsroboter	Taktile Eingabegeräte
3. Virtuelles Training	2. Optische Ausgabegeräte
4. Virtuelle Produktentwicklung	3. Akustische Ausgabegeräte
5. Gemeinsame Aufgabenelemente	4. Virtuelle Realität
III. Gestaltungskriterien	
1. Präsenzepfinden	
2. Performanz	
IV. Gestaltungsaspekte	
1. Differentielle Aspekte	
2. Motorische Aspekte	
3. Sensomotorische Aspekte	
4. Sensorische Aspekte	
V. Gestaltungsempfehlungen	
1. Heuristische Evaluation	
2. <i>PRESENCE</i> – Design Guide	

Abb. 1: Vorgehen und Gliederung.

I Einführung und Anwendungsfelder

Das ingenieurpsychologische Interesse der Telemanipulation gilt der Betrachtung eines speziellen Mensch-Maschine-Systems, bei dem zwischen dem menschlichen Benutzer und der ausführenden Maschine eine Barriere liegt. Die Barriere entsteht immer dann, wenn der Arbeitsraum nur schwer zugänglich oder einsehbar ist, wie das bei Mikro- oder Weltraummontagen der Fall ist oder bei minimal invasiven Operationen (Bejczy, 2002; Sheridan, 2002).

Telemanipulationssysteme bestehen aus drei Komponenten, die stark vereinfacht eine Fernsteuerung beschreiben: einem Telearbeitsplatz, einem Rechnersystem und einer Ausführungseinheit (Abb. 2). Der Telearbeitsplatz besteht mindestens aus einem hochleistungsfähigen optischen Ausgabesystem sowie einem Eingabegerät. Mit Hilfe des Rechnersystems können die Kommandos des Benutzers an das räumlich getrennte Ausführungssystem weitergeleitet werden. Dieses verfügt über Effektoren, um Eingaben auszuführen, sowie über Sensoren, um Informationen aufzunehmen. Der menschliche Arbeitsplatz wird auch als ‚Master‘ bezeichnet und das Ausführungssystem als ‚Slave‘.

Bei *virtuellen Umgebungen* besteht das Mensch-Maschine-System nur aus der menschlichen Ein- und Ausgabeseite sowie einem Rechnersystem. Im Unterschied zur Telerobotik fehlt die Ausführungseinheit und alle Ausgaben sind lediglich simuliert. Virtuelle Umgebungen finden sich nicht nur in der Unterhaltungsindustrie, sondern auch im Simulatortraining für die Mediziner- und Pilotenausbildung oder in der virtuellen Produktentwicklung (Blade & Padgett, 2002; Stanney, 2003; Burdea & Coiffet, 2003).

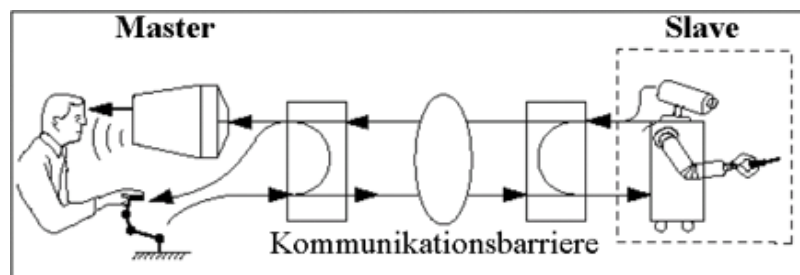


Abb. 2: Räumliche Entkopplung von ‚Master‘ und ‚Slave‘ in Telepräsenzsystemen (Quelle: Sonderforschungsbereich 453, TU München).

Die technische Herausforderung besteht vor allem darin, die Umgebung so zu generieren, dass der Anwender in die Virtualität eintaucht. Im Idealfall wird sowohl in der Telemannipulation als auch in der Simulation die bestehende Barriere für den menschlichen Benutzer überwunden. In dem Zusammenhang wurde bereits 1980 von Marvin Minsky der Begriff *Telepräsenz* eingeführt, so dass man auch von Telepräsenzsystemen spricht.

1 Montageroboter

Eine telepräsenste Montage bietet sich immer dann an, wenn das Arbeitsumfeld aufgrund seiner Größe oder seiner Entfernung schwer zugänglich ist. Exemplarisch sollen hier die beiden Einsatzbereiche der Mikro- und der Weltraummontage vorgestellt werden.

Von *Mikromontage* spricht man, wenn die Bauteile entweder kleiner als einen Millimeter sind oder wenn eine Positioniergenauigkeit von unter hundert Mikrometer gefordert ist (Yang et al., 2003). Derartige Miniaturkomponenten sind in vielen Alltagsgegenständen verbaut, wie zum Beispiel im Airbag eines Autos, im Schreib- und Lesekopf einer Festplatte oder in mikrostrukturierten Flachbildschirmen (Jacob, 2002). Eine automatisierte Fertigung ist meistens aufgrund der unzureichenden Flexibilität der Systemkomponenten nicht möglich, so dass die Manipulationen auch heute noch vorwiegend manuell durchgeführt werden (Zhou & Nelson, 2000).

Bedingt durch die hohe Fügepräzision, die Empfindlichkeit der Bauteile sowie die notwendigen Vorkehrungen, um Kontaminationen zu vermeiden, sind die Arbeitsbedingungen beanspruchend und lassen sich durch den Einsatz von Telepräsenztechnologie verbessern: Für die Montagetätigkeit kann zum Beispiel ein Roboter manipulator in einem Reinraum eingesetzt werden, der von einem Computerarbeitsplatz aus dem Nebenraum bedient wird. Die Montageszenen können dann vergrößert auf einem Bildschirm dargestellt werden und die menschlichen Bewegungen durch entsprechende Skalierungen auf den Mikromanipulator übersetzt werden.

Neben der Arbeitserleichterung in der Mikromontage ermöglicht Telepräsenztechnologie auch, *Weltraummontagen* von einer Bodenstation aus zu steuern. Von besonderem Interesse ist das Problem der Zeitverzögerung, wenn sich der ‚Master‘ auf der Erde und der ‚Slave‘ im Weltraum befindet.

Gewöhnlich kumulieren die Datenübertragungszeiten dabei wegen multipler Kommunikationsverbindungen und Signalpufferzeiten auf bis zu sechs Sekunden (Sheridan,

1993). Problematisch ist, dass selbst für Zeitverzögerungen von 0.3 Sekunden eine sensorische Adaption misslingt und die Bewegungen des Telemanipulators mit den eigenen Handbewegungen dissoziiert werden (Held et al., 1966; Bejczy et al., 1990).

Im einfachsten Fall bedient sich der menschliche Benutzer einer ‚Move-and-Wait‘ Strategie (Ferrell, 1965; S. 24). Der Operateur macht eine diskrete Steuerungsbewegung und wartet dann die Signallaufzeitverzögerung ab, um eine Rückmeldung über seine Handlung zu erhalten, bevor er eine weitere Bewegung initiiert.

Eine technisch aufwändigere, aber intuitivere Lösung stellen Prognosedisplays dar (Shackel, 1976; Kim, 1996; Kheddar et al., 2002). Hier wird das Verhalten des Roboters im Weltraum vorhergesagt. Die prognostizierte Bewegung wird dann in einem virtuellen Modell dargestellt, welches das verzögerte reale Videobild überlagert. Bei der virtuellen Roboterrepräsentation handelt es sich in der Regel um ein durchsichtiges Drahtmodell, so dass die reale Videoaufnahme kaum verdeckt wird.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat Prognosedisplays bereits in zwei Weltraummissionen erfolgreich eingesetzt. In dem Projekt ROTEX, das im April 1993 innerhalb des Columbia Shuttle durchgeführt wurde, konnte ein Weltraumroboter sowohl von den Astronauten als auch von der Bodenstation gesteuert werden. Da die Vor-simulation und die Sensordaten eine sehr gute Übereinstimmung aufwiesen, wurde das Steuerungskonzept als voller Erfolg bezeichnet (Hirzinger et al., 1993).

Ebenso konnte im April 1999 in dem Projekt GETEX ein Roboterarm, der auf einem Satelliten angebracht war, erfolgreich mit einem virtuellen Steuerungskonzept kommandiert werden (Hirzinger & Landzettel et al., 2001).

2 Operationsroboter

Ein anderes Anwendungsfeld mit großem Zukunftspotenzial stellen chirurgische Manipulatoren dar (Çavuşoğlu et al., 1999; Taylor & Joskowicz, 2003). Mit dem Operationsroboter steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem das Spektrum der *minimal invasiven Operationstechniken*, der so genannten ‚Schlüsselloch-Chirurgie‘, erweitert werden kann.

Während bei der konventionellen, offenen Herzoperation der Brustkorb des Patienten vollständig geöffnet werden muss, genügen hier drei ungefähr zehn Millimeter große Öffnungen: Durch zwei Trokare werden Mikroinstrumente in den menschlichen Körper eingeführt und durch den dritten ein stark vergrößerndes Stereolaparoskop eingebracht.

Die Bilder werden auf eine räumlich getrennte Konsole übertragen und dort an den Operateur ausgegeben, dessen Fingerbewegungen in winzige Bewegungen der beiden im Brustkorb befindlichen mikrochirurgischen Instrumente umgesetzt werden. Der Robotereingriff ermöglicht dabei hohe Präzision: Bewegt der Chirurg seine Hände um beispielsweise zwei Zentimeter, so kann die Instrumentenspitze durch eine geeignete Transformation lediglich ein Fünftel der Strecke zurücklegen und so der natürliche Tremor des Operateurs herausgefiltert werden.

Durch die mechanische Entkopplung von Chirurg und Operationsfeld ist es sogar denkbar, chirurgische Eingriffe über weite Entfernungen hinweg durchzuführen. In einer Weltpremiere wurde am 7. September 2001 eine transatlantische Teleoperation durchgeführt und auf den symbolischen Namen ‚Operation Lindbergh‘ getauft (Abb. 3).

In einem etwa einstündigen Eingriff wurde eine Gallenoperation an einer Patientin in Straßburg von New York aus durchgeführt. Die Patientin befand sich mit zwei Chirurgen und dem Medizinroboter in einem Straßburger Krankenhaus, während die Roboterarme von einem 7.500 Kilometer entfernten Büro gesteuert wurden. Der Operateur hielt über ein Videokonferenzsystem den Kontakt zu seinen französischen Kollegen und konnte über Spracheingabe eine Operationskamera bewegen (Marescaux et al., 2001).

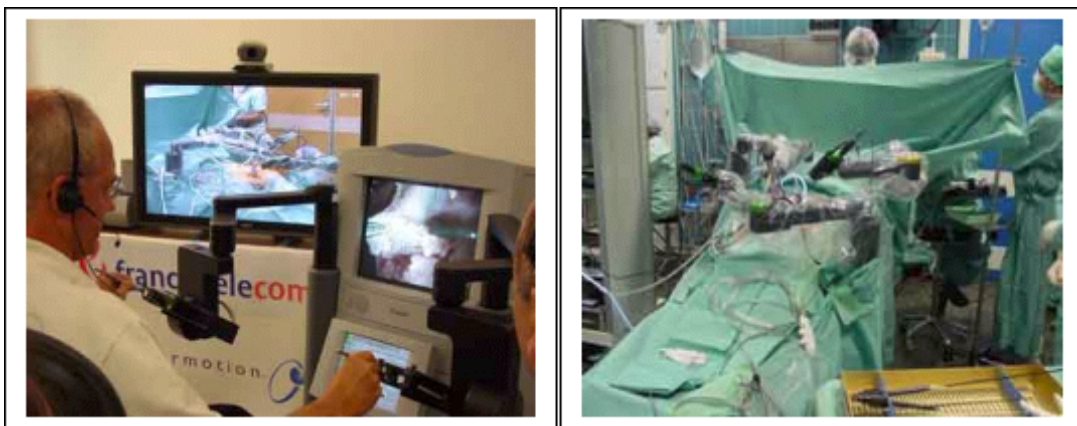


Abb. 3: ‚Operation Lindbergh‘: Der Chirurg operierte von New York (links) aus eine Patientin, die sich in einem Krankenhaus in Straßburg (rechts) befand (Quelle: Web-Surg, virtual surgical university).

Mit der robotergestützten Chirurgie steht eine patientenschonende Operationstechnik zur Verfügung, mit der sich nicht nur die postoperativen Schwächen, sondern auch die Infektionsgefahr verringern lassen. Demgegenüber steht aber der Nachteil, dass durch das indirekte Manipulieren in der Körperhöhle das Operationsgewebe nicht betastet werden kann (Rosen et al., 1999).

3 Virtuelles Training

Die Einführung minimal invasiver Operationstechniken hängt nicht nur von der Verbesserung der Feedbackqualität ab, sondern ebenso entscheidend von geeigneten Trainingsmöglichkeiten. In der offenen Chirurgie besteht meist eine ausgeprägte Lehrer-Schüler-Beziehung: Der lernende Chirurg assistiert zunächst und übernimmt dann Teile einer Operation. Dabei kann der erfahrene Chirurg in kritischen Momenten jederzeit eingreifen. Aufgrund der eingeschränkten Sichtverhältnisse ist es bei einem minimal invasiven Eingriff wesentlich schwerer, ein Situationsmodell aufzubauen, so dass abwechselndes Operieren nicht möglich und ein Chirurg überwiegend auf sich selbst gestellt ist (Eyal & Tendick, 2001; Kondraske et al., 2002; Satava & Jones, 2002).

Da bei diesen Techniken ohnehin eine Visualisierung erforderlich ist, bietet sich ein virtuelles Training an, bei dem die Rechneinheit das Operationsszenario lediglich simuliert und keine Roboterhandlungen vorgenommen werden. Als Ersatz für einen Patienten dient eine Box in der Form eines menschlichen Rumpfes. Diese Benutzerschnittstelle erlaubt dem Chirurgen verschiedene Instrumente in gewohnter Weise einzuführen und zu bewegen. Durch ein Simulationssystem werden dann alle notwendigen Berechnungen vorgenommen und die virtuelle Sicht in Echtzeit generiert. Detailgetreues Wissen aus Datenbanken, wie zum Beispiel Deformierung des Weichgewebes oder pulsierendes Bluten nach Gefäßverletzungen verbessern dabei den Realitätsgehalt (Kühnapfel et al., 2000; Tendick et al., 2000).

Der Einsatzbereich virtueller Trainer ist sehr vielfältig (Cobb et al., 2002; Moshell & Hughes, 2002; Lathan et al., 2002). Neben medizinischen Anwendungen und den weit verbreiteten Fahr- und Flugsimulatoren gibt es auch Applikationen für die Psychotherapie, in denen ein Desensibilisierungstraining mit phobischen Patienten an virtuellen Stimuli durchgeführt wird. Der Patient navigiert dabei durch eine virtuelle Umgebung, in der sich der angstauslösende Stimulus befindet. Anders als bei der konventionellen in vivo Konfrontation kann das Szenario jederzeit beendet werden. Gleichzeitig ist die Darbietungsform realistischer und weniger von der Vorstellungskraft des Patienten abhängig als eine imaginale Desensibilisierung.

Die Wirksamkeit der *virtuellen Expositionstherapie* (VRET, Virtuel Reality Exposure Therapy) wurde zum Beispiel bereits für Klaustrophobie, Akrophobie, Agoraphobie und Arachnophobie nachgewiesen (Rothbaum et al., 2000; Emmelkamp et al., 2001; Wiederhold & Gevirtz et al., 2001; Difede & Hoffman, 2002; Jang et al., 2002; Schubert &

Regenbrecht, 2002). Auch soziale Umgebungen können zu Therapiezwecken simuliert werden. Dabei werden virtuelle Personen, so genannte Avatare, modelliert, die wie reale Personen agieren. Experimentelle Untersuchungen liegen hier für die Therapie von Sprechangst vor (Botella et al., 2000; Pertaub et al., 2002).

Virtuelle Lernumgebungen können sehr unterschiedlich genutzt werden und sind geeignet, um motorische, kognitive oder soziale Fähigkeiten zu trainieren. Die Herausforderung besteht allerdings immer darin, einen Transfereffekt zur realen Aufgabebearbeitung sicherzustellen.

4 Virtuelle Produktentwicklung

Die Simulation findet nicht nur Einsatzmöglichkeiten im Trainingsbereich, sondern kann auch zur Kostenreduzierung in der Produktentwicklung beitragen. Unter virtueller Produktentwicklung versteht man einen methodischen Ansatz zur rechnergestützten Konstruktion eines Produktes und die Simulation aller nachgeschalteten Fertigungsprozesse (Davies, 2002; Shewchuk et al., 2002).

Dabei werden zunächst mit Hilfe eines CAD-Systems dreidimensionale Produktmodelle entworfen. Diese bilden die Grundlage für die Simulation eines ersten virtuellen Prototyps, der einer realistischen Repräsentation des Produktes entspricht. Mit Hilfe der virtuellen Nachbildung kann die Konstruktion konzeptionell hinsichtlich Statik, Dynamik, Sicherheit und Machbarkeit abgesichert werden, ohne dass teure und zeitraubende Musterbauten angefertigt werden müssen.

Die Simulation bietet, im Gegensatz zu einer realen Maschine, auch die Möglichkeit, Abläufe transparent zu gestalten und das Produktmodell auf Zugänglichkeit und Verbaubarkeit hin zu prüfen. Daneben können bewegliche Bauteile einer Kollisionsprüfung unterzogen werden.

5 Gemeinsame Aufgabenelemente

Um im Folgenden möglichst allgemeingültige Gestaltungsaussagen zu generieren, gilt es, elementare Handlungseinheiten zu finden, die den obigen Anwendungen gemeinsam sind. Dabei scheint folgende Kategorisierung sinnvoll (Abb. 4):

Im einfachsten Fall liegt eine Handlung vor, die in der Mensch-Computer Interaktion als ‚*Point-and-Click*‘ bezeichnet wird. Ähnlich wie bei zweidimensionalen Anwendungen mit einem Cursor ein Menü oder ein Button betätigt wird, sind Selektionshandlungen auch in Telepräsenzsystemen notwendig, um Objekte überhaupt erst aufgreifen zu können (Akamatsu et al., 1995; Lindeman et al., 1999).

Soll ein aufgegriffenes Objekt exakt an einer Zielposition platziert werden, so spricht man in der Robotik von ‚*Pick-and-Place*‘ (Adams et al., 2001; Turner, 2001). Diese Handlung liegt zum Beispiel vor, wenn ein Chirurg bei einer Operation eine Klemme setzt, ein Mikromonteur einen Chip auf eine Platine steckt oder ein Biochemiker durch ‚molecular docking‘ Molekülstrukturen virtuell manipuliert (Sankaranarayanan et al., 2003; S. 364).

Soll ein aufgegriffenes Objekt in eine Öffnung eingeführt werden, so handelt es sich um ‚*Peg-Insertion*‘. Damit kann sowohl eine Intubation in der Telemedizin gemeint sein, bei der ein Schlauch in den Patienten eingeführt wird, als auch eine Fügeaufgabe in der Telemontage (Lécuyer et al., 2002; Unger et al., 2002).

Das Nähen in der Telemedizin stellt eine Variation dar, die als ‚*Needle-Insertion*‘ bezeichnet wird: Die Nadel wird zwar an einer definierten Gewebestelle eingestochen, allerdings mit der Auflage, das darunter liegende Gewebe nicht zu verletzen (Kontarinis & Howe, 1995; Gerovichev et al., 2002).

Während es bei den obigen Manipulationen entscheidend ist, eine bestimmte Endposition zielstrebig zu erreichen, ist beim ‚*Tracking*‘ das exakte Folgen einer Spur erfolgsrelevant (Fong et al., 2000; Mücke, 2000). Das ist erforderlich, wenn ein Telechirurg eine Arterie freilegt, ein Telemonteur ein Werkstück zuschneidet oder in der virtuellen Produktentwicklung nach dem optimalen Montagepfad gesucht wird.

Neben Manipulationen können Teleoperationen auch *Explorationen* erfordern, bei denen die physischen Materialeigenschaften eines Objektes im Vordergrund stehen. Während es für einen Telemediziner wichtig sein kann, Verhärtungen in einem Gewebe aufzuspüren, kann es in der Montage zum Beispiel erforderlich sein, Verunreinigungen oder Flüssigkeiten aufzufinden (Howe et al., 1995; Kontarinis & Howe, 1995; Lederman & Klatzky, 1999).

Vervollständigt man die Aufgabenanalyse, so muss zudem die Handhabung des Eingabegerätes berücksichtigt werden. England (1995) unterscheidet zum Beispiel, ob eine Aufgabe direkt, mit der Hand, oder indirekt, mit einem Werkzeug, ausgeführt wird. Daneben kann ein Objekt zum Beispiel mit der ganzen Hand umschlossen werden, um eine besonders stabile und sichere Haltung zu erzielen, oder aber mit den Fingerspitzen gehalten werden, um feinmotorische Aufgaben auszuführen. Hajian und Howe (2000) unterscheiden dementsprechend ein Kontinuum aus Kraft- und Präzisionsgriffen. Wenngleich es sich bei der Klassifikation um eine Vereinfachung handelt, werden die für Telepräsenzsysteme wesentlichen Handlungseinheiten ausreichend differenziert beschrieben.







Handlungseinheiten	
	Point-and-Click Ein Objekt wird durch einen Buttondruck aktiviert.
	Pick-and-Place Ein Objekt wird exakt an einer Zielposition abgelegt.
	Peg-Insertion Ein Objekt wird in einer Öffnung versenkt.
	Tracking Einer Spur wird exakt gefolgt.
Handhabung	
	Kraftgriff Ein Objekt wird mit der ganzen Hand umschlossen.
	Präzisionsgriff Ein Objekt wird mit den Fingerspitzen gehalten.

Abb. 4: Aufgabenelemente in Telepräsenzsystemen.

II Technischer Hintergrund

Die WIMP-Schnittstelle, in der Fenster (Windows), Piktogramme (Icons), Menüs (Menus) und Zeigegeräte (Pointers) integriert sind, ist für Telepräsenz Anwendungen bei weitem nicht ausreichend. Telepräsenzsysteme erfordern ein völlig neuartiges Interaktionskonzept, für die Ein- und Ausgabegeräte modifiziert oder neu entwickelt werden müssen.

Aus psychologischer Sicht ist vor allem die Betrachtung der Benutzerseite von Interesse, während die Gestaltung des ausführenden Telemanipulators in erster Linie eine technische Fragestellung darstellt.

1 Haptische Eingabegeräte

Oren (1990) beobachtete, dass neue Technologien oftmals ein Anfangsstadium durchlaufen, in dem bereits etablierte Interaktionsmetaphern fortbestehen, obwohl sie den veränderten Anforderungen nicht mehr genügen. Die konventionelle Computermaus lässt sich nach links und nach rechts sowie nach vorne und nach hinten bewegen; das Gerät erlaubt keine Steuerung von Objekten im Raum und ist damit für den Einsatz in Telepräsenzsystemen eigentlich nicht geeignet. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung wird vielfach aber trotzdem versucht, das Gerät weiterzuverwenden. Im einfachsten Fall erfordert dies eine Softwareadaptation, bei der durch das Gedrückthalten einer Maustaste Bewegungen in die Tiefe des Raumes möglich sind. Diese Modifikation wird auch als ‚*Switching-Metapher*‘ bezeichnet (Zhai, 1998).

Innovativer ist der Umbau einer Maus, wie das bei der *Spacemouse* der Fall ist (Abb. 5). Dieses Gerät wird nicht wie eine konventionelle Computermaus auf dem Tisch bewegt, sondern besteht aus einem Gestell, auf dem unter einer Sensorkappe ein beweglicher Ball angebracht ist. Die Kappe wird durch feine Bewegungen des Daumens und des Zeigefingers nach links und rechts, nach vorne und hinten sowie nach oben und unten bewegt oder gedreht (Hirzinger et al., 1999). Beim *Spaceball* wird auf die Anbringung einer Sensorkappe verzichtet, so dass die Eingabe unmittelbar durch die Bewegung des Balles erfolgt.

Andere Entwickler verfolgen nicht die Modifikation zweidimensionaler Eingabegeräte, sondern suchen nach einem vollständig neuen Bedienkonzept, indem sie reale Objekte oder Werkzeuge als *Spezialeingaben* nachbauen (Fitzmaurice et al., 1995; Stoackley et al., 1995). Eine solche applikationsspezifische Schnittstelle liegt zum Beispiel für neurochirurgische Anwendungen vor. Zur Eingabe dienen ein Miniaturkopf und ein Skalpell, mit dem durch Zeigebewegungen die gewünschten Areale in einer Magnetresonanzaufnahme freigelegt werden können (Hinckley et al., 1998).



Abb. 5: Passive Eingabegeräte: *Links:* Spacemouse und Spaceball (Quelle: 3dConnexion) – *Rechts:* Spezialeingabe für die Neurochirurgie (Quelle: Hinckley et al., 1998).

Diese Eingabegeräte können zwar Positionen und Bewegungseingaben aufnehmen, aber keine Signale ausgeben. Bedenkt man, dass die menschliche Haut und der Muskelapparat sowohl Signale senden als auch empfangen können, nutzen diese passiven Schnittstellen die Möglichkeiten nur eingeschränkt.

Eine Weiterentwicklung stellen deshalb aktive Eingabegeräte dar, die durch Kraftfeedback die Muskelsensoren des Benutzers stimulieren oder durch taktiles Feedback eine passive Stimulation der Hautrezeptoren bewirken. Die Gesamtheit der Tastwahrnehmungen wird auch als Haptik bezeichnet (Zwisler, 2001; Biggs & Srinivasan, 2002; Iwata, 2003).

1.1 Krafterückmeldende Systeme

Bei einem kraftreflektierenden System werden durch Seilzüge oder Gestänge, die elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch betrieben werden, Kräfte auf die Muskeln übertragen. Die Systeme können nach ihrem Arbeitsprinzip kategorisiert werden und dementsprechend zwischen am Körper getragenen und nicht tragbaren Systemen unterschieden werden (Abb. 6).

Nicht-tragbare Systeme können am Boden, an der Wand, an der Decke oder am Schreibtisch fixiert sein. Dabei handelt es sich im einfachsten Fall um die Weiterentwicklung eines passiven *Joysticks* (z.B. Impulse Engine, Immersion Corp.).

Eine neue Variante aktiver Eingabegeräte stellt das *PHANToM* (Personal Haptic Interface Mechanism, SensAble Inc.) dar, dessen Hauptkomponente ein beweglicher Kraft-Feedback-Arm mit bis zu sechs Freiheitsgraden ist. Da die Kräfte entweder über einen Fingerhut oder einen Stift an den Benutzer ausgegeben werden, kann das Gerät aber nur über die an einem einzigen Punkt auftretenden Kräfte informieren. Damit eignet es sich eher für das sequentielle Abtasten eines Objektes und weniger für flächige Explorationen (Massie & Salisbury, 1994). Wenngleich diese Einschränkung für bestimmte Anwendungen einen entscheidenden Nachteil darstellt, ist das PHANToM weit verbreitet.

Daneben werden auch nicht-tragbare, aktive Spezialeingabegeräte entwickelt. Hier ist zum Beispiel der *Manipulator* des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt zu nennen (Hirzinger & Albu-Schäffer et al., 2001). An dem Roboterarm können aufgabenabhängig verschiedene Eingabeelemente angebracht werden; wird eine Kopie als Telemanipulator eingesetzt, so ist durch die kinematische Gleichheit von ‚Master‘ und ‚Slave‘ eine besonders intuitive Steuerung möglich.

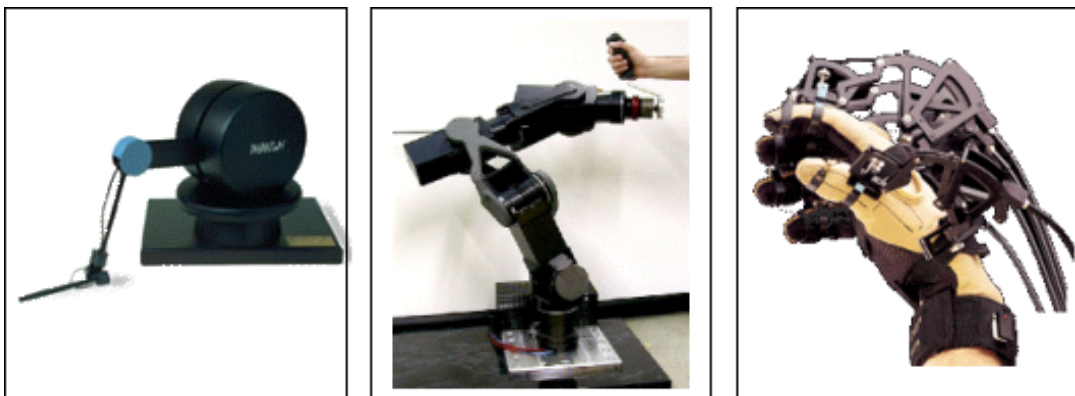


Abb. 6: Kraftrückmeldende Systeme: *Links:* PHANToM (Quelle: SensAble Technologies Inc.) – *Mitte:* DLR-Manipulator (Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) – *Rechts:* Exoskelett, CyberGrasp (Quelle: Immersion Corp.).

Die Anwendbarkeit nicht-tragbarer Systeme ist immer dann eingeschränkt, wenn die Bewegungsfreiheit des Benutzers von Bedeutung ist. Erst Schnittstellen, die am Körper getragen werden, unterstützen natürliche Bewegungen. Tragbare Systeme sind allerdings schwieriger zu entwickeln, da Gewicht und Volumen begrenzt sein müssen, um

den Benutzer nicht zu ermüden. Durch gelenkige Gestänge, die am Rücken, am Arm oder an der Hand des Anwenders befestigt sind, erinnert dieser Gerätetyp an ein Skelett, so dass man von *Exoskeletten* spricht. Anders als geometrisch konstante Geräte müssen diese Datenhandschuhe an den Benutzer angepasst und kalibriert werden (Burdea et al., 1992; Rohling & Hollerbach, 1993; Sturman & Zeltzer, 1994).

1.2 Taktile Systeme

Kraftreflektierende Systeme unterstützen die aktive, manipulatorische Wahrnehmung und informieren über das Gewicht oder die Elastizität von Objekten. Demgegenüber informieren taktile Schnittstellen über Druck, Berührung, Vibration oder Temperatur.

Ein Großteil der taktilen Displayforschung war ursprünglich dadurch motiviert, blinden Personen Zugang zu ihrer Umwelt zu ermöglichen. Eine taktile Computeranzeige, die Text in Form von Blindenschrift oder Grafiken in tastbarer Form darstellt, bezeichnet man als *Braille Display* (van Scoy et al., 2001). Werden Braille Elemente in eine Computermaus oder einen Datenhandschuh integriert, so kann diese Technologie aber auch Sehende unterstützen und zum Beispiel einem minimal invasiven Chirurgen das feinfühlig Ertasten von Gewebeverhärtungen ermöglichen. Taktile Displays können in unterschiedliche Geräte eingebaut werden, die im Wesentlichen auf vier verschiedenen Technologien basieren, die in Abbildung 7 dargestellt sind (Burdea, 1996):

Bei der *pneumatischen Stimulation* sind zum Beispiel in einem doppelbeschichteten Handschuh kleine Luftkissen eingearbeitet, die Druck auf den Finger des Benutzers ausüben, wenn sie aufgeblasen werden. Ein statischer Kissendruck simuliert dabei die Greifkräfte und eine sequentielle Ansteuerung der Kissen ruft die Empfindung einer Objektexploration hervor (Stone, 2001; Moy et al., 2000).

Eine weitere Möglichkeit besteht in der *vibrotaktilen Stimulation*. Vibrationsempfindungen werden durch Miniaturlautsprecher, Vibrationsmotoren oder ein Feld eng beieinander liegender Stifte, die einzeln angehoben und gesenkt werden, hervorgerufen (Okamura et al., 2000; Wagner & Lederman et al., 2002; Murray et al., 2003).

Kutane Rezeptoren lassen sich außerdem durch *elektrotaktile Stimulation* erregen. Das Effektorsystem kann aus zwei Elektroden bestehen, welche die Form konzentrischer Kreise haben. Während die äußere Elektrode den Hautstrom erdet, ist die innere aktiv

und kann eine geringe Stromstärke applizieren. Je kleiner diese Elektrode ist, umso lokalisierter ist die taktile Empfindung. Wird allerdings der Hautkontakt zu klein, so kann die lokale Stromstärke zu stark und schmerzhaft sein (Kajimoto et al., 2001; Kaczmarek & Haase, 2003).

Die bislang beschriebenen Stimulationen unterstützen die Wahrnehmung von Oberflächentexturen und Geometrien. Eine realistische haptische Empfindung wird schließlich auch durch das Fühlen von Oberflächentemperaturen hervorgerufen. Thermale Displays basieren auf der *Peltier-Technik* (Monkman & Taylor, 1993; Bergamasco et al., 1997). Der französische Uhrmacher Peltier hat 1834 beobachtet, dass Strom, der durch zwei verschiedene, aber miteinander verbundene Materialien fließt, an der Verbindungsstelle ein Temperaturgefälle entstehen lässt. Mit diesen thermoelektrischen Pumpen können die Fingerspitzen gezielt gekühlt oder erwärmt werden und dadurch unterschiedliche Temperaturen ausgegeben werden, aber auch verschiedene Materialien simuliert werden. Dabei kommt die Tatsache zum Tragen, dass jedes Material eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit aufweist und menschliche Thermosensoren zwei Materialien auch bei gleicher objektiver Temperatur verschieden wahrnehmen. Stoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Metall) leiten die Wärme schneller ab als Stoffe mit niedriger Leitfähigkeit (z.B. Holz) und werden deswegen als subjektiv kälter empfunden. Wäre dies nicht der Fall, so würde sich jedes Objekt, das sich in einem Raum mit einer bestimmten Zimmertemperatur befindet, gleich kalt oder warm anfühlen (Gibson, 1973; Stevens, 1991).

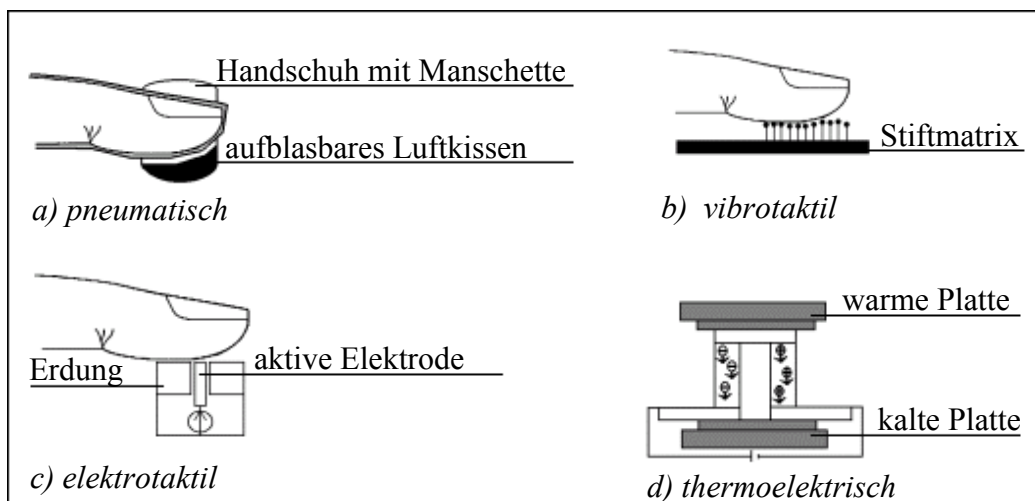


Abb. 7: Taktile Systeme: Kutane Empfindungen lassen sich durch (a) pneumatische, (b) vibrotaktile und (c) elektrotaktile Stimulation oder durch (d) thermoelektrische Pumpen hervorrufen (Burdea, 1996).

Welche Wahrnehmungsphänomene taktile Ausgaben im Einzelnen hervorrufen, hängt von vielen Faktoren ab (Challis & Edwards, 2001): Die Effektoren können verschieden groß sein und damit entweder diffuse oder genauer lokalisierbare Empfindungen zur Folge haben. Da das räumliche Auflösungsvermögen an verschiedenen Stellen des menschlichen Bewegungsapparates relativ großen Schwankungen unterliegt, muss der Ort der Reizdarbietung berücksichtigt werden. Die höchste Auflösung liegt in den Fingerspitzen vor. Hier können bereits Punkte mit einem Abstand von nur 0.8 Millimeter reliabel ertastet werden. Zur Konstruktion haptischer Displays empfiehlt es sich deshalb, im Einzelfall Absolutschwellen und ebenmerkliche Unterschiede durch psychophysische Methoden genauer zu spezifizieren (Rollman, 1969; Röder & Rösler, 2001).

2 Optische Ausgabegeräte

Die Qualität der Displaytechnologie wird häufig mit dem Begriff ‚*Immersion*‘ beschrieben (Slater & Wilbur, 1997). Deckt das Display das gesamte Gesichtsfeld ab, so spricht man von einem voll-immersiven System. Ist der Umfang kleiner, so handelt es sich um ein semi-immersives System. Für Desktop Systeme ist der Begriff nicht-immersiv reserviert. Optische Ausgabegeräte können aber, ähnlich wie die Eingabegeräte, auch nach ihrem Arbeitsprinzip kategorisiert werden und dementsprechend zwischen kopfbasierten Systemen und nicht-tragbaren, stationären Umgebungssystemen unterschieden werden (Abb. 8):

Zu den kopfbasierten Geräten zählen tragbare Datenhelme, so genannte Head-Mounted-Displays (HMDs). Diese immersiven Systeme existieren mittlerweile in vielen Varianten und sind an verschiedene Aufgaben angepasst worden (Luczak et al., 2003). Manche HMDs verzichten auch auf die Anbringung am Kopf. Als Tischgeräte ähneln sie dann Mikroskopen oder Ferngläsern, die zum Beispiel in Schifffahrtsimulatoren eingesetzt werden können.

Kopfbasierte Systeme bestehen im Wesentlichen aus einem stereoskopischen Display und einem Gerät zur Bestimmung der Kopf- und Blickbewegungen, das als ‚Tracker‘ bezeichnet wird. Technisch basieren ‚Tracker‘ auf einer Sender-Empfänger Methode, einer bildbasierten Technik oder auf Trägheits- und Gyroskopsensoren (Azuma et al., 1999; You & Neumann, 2001; Foxlin, 2002). Ein wesentliches Gütekriterium der Systeme ist, Aktionen des Benutzers, wie Drehen des Kopfes, verzögerungsfrei darzustellen

len. Beträgt die Zeitverzögerung bereits mehr als zehn Millisekunden, so kann das beim Benutzer Desorientierung, Kopfschmerz oder Übelkeit hervorrufen. Dieses Unwohlsein wird auch als Bewegungskrankheit, Nausea oder „Cybersickness“ bezeichnet (Kennedy et al., 1993; Harm, 2002; Lawson et al., 2002; Stanney et al., 2002; S. 344). Hier kommt die bekannte Tatsache zum Tragen, dass widersprüchliche Informationen aus verschiedenen Sinnesmodalitäten zu Wahrnehmungskonflikten führen können (Bischof, 1966). Ähnlich wie bei der Seekrankheit die stabile visuelle Umgebung innerhalb des Schiffes mit der durch den vestibulären Sinn wahrgenommenen Bewegung kollidiert, kann eine durch HMDs erzeugte bewegte visuelle Umgebung bei einer in Wirklichkeit stabilen Umwelt zur Simulatorkrankheit führen.

Eine Alternative zu den kopfbasierten Systemen stellen Projektionssysteme dar, die sich technisch vor allem durch die Gestaltung der Leinwand und der Projektoren unterscheiden. Die Leinwand kann entweder kubisch oder sphärisch gestaltet sein. Die erste Variante wird als *CAVE* (Cave Automatic Virtual Environment) bezeichnet (Cruz-Neira et al., 1992). Dabei handelt es sich um einen begehbaren Raum, in dem der Benutzer von halbtransparenten Leinwänden umgeben ist, auf die das Bild über Spiegel rückprojiziert wird. Die zweite Variante stellen sphärische Projektionsumgebungen, so genannte *Vision Domes*, dar (Hirose, 1997; Popp, Platzer et al., 2004). Bei beiden Systemen müssen allerdings, verglichen mit Flachbildschirmen, zusätzliche technische Veränderungen vorgenommen werden: Wird zum Beispiel ein zweidimensionales Pixelbild mit einem sphärischen Linsensystem auf eine konkave Leinwand projiziert, so weist das resultierende Bild Verzerrungen auf. Für eine korrekte Darstellung muss es erst durch eine entsprechende geometrische Transformation vorverzerrt werden.



Abb. 8: Optische Ausgabegeräte: *Links:* Head-Mounted-Display (Quelle: Fifth Dimension Technologies Inc.) – *Rechts:* CAVE (Quelle: Fakespace Systems Inc.).

Außerdem besteht bei Projektionsumgebungen durch das Tragen spezieller Brillen auch die Möglichkeit, einen dreidimensionalen Bildeindruck zu erzeugen. Dabei können Verfahren eingesetzt werden, welche die Raumwahrnehmung des menschlichen Auges nachempfinden. Die Tiefenwahrnehmung basiert unter anderem auf der Differenz der Sehwinkel beider Augen und wird als binokulare Parallaxe bezeichnet (Goldstein, 2001).

Beim *Polarisationsverfahren* wird diese Winkelverschiebung durch zwei Projektoren erreicht, die zusätzlich mit je einem Polarisationsfilter ausgestattet sind und deren Polarisationsachsen zueinander senkrecht stehen. Beide Bilder werden übereinander projiziert und von einem Benutzer mit einer speziellen Brille betrachtet. Pro Brille werden dabei zwei unterschiedliche Gläser verwendet, die als Filter funktionieren und nur für polarisiertes Licht je einer der Achsen durchlässig sind. Da jedes Auge nur ein bestimmtes Bild wahrnehmen kann, entsteht ein stereoskopischer Eindruck.

Während beim Polarisationsverfahren beide Stereobildpaare gleichzeitig gezeigt werden, werden bei der *Shuttertechnik* zwei Bilder in schneller Reihenfolge abwechselnd dargeboten (Hodges, 1992): Die Gläser der Shutterbrille können durch Flüssigkeitskristalle wechselseitig verdunkelt werden. Wird das Ein- und Ausschalten mit den zwei unterschiedlichen Bildern des Projektors synchronisiert, so entsteht der Eindruck eines dreidimensionalen Bildes.

3 Akustische Ausgabegeräte

Bei der Gestaltung von Telepräsenzsystemen wird der visuellen Informationsverarbeitung häufig mehr Aufmerksamkeit geschenkt als der auditiven. Gerade über den auditiven Kanal können aber eine Vielzahl von Signalen übermittelt werden, die visuelle Zuwendung und erhöhte Aufmerksamkeit zur Folge haben. So kann es insbesondere bei einem reduzierten visuellen Gesichtsfeld sinnvoll sein, HMDs mit Kopfhörern auszustatten, beziehungsweise in Projektionsumgebungen Lautsprecher vorzusehen.

Bei einer realitätsgetreuen Simulation von Audiosignalen ist die Funktionsweise des räumlichen Hörens nachzuempfinden. Da das eine Ohr von der Schallquelle weiter entfernt liegt als das andere und sich zudem auf der der Schallquelle abgewandten Seite des Kopfes befindet, wird die Wahrnehmung der Richtung einer Schallquelle in einer

horizontalen Ebene wesentlich durch die binauralen Differenzen im Schalldruckpegel sowie den binauralen Zeitdifferenzen bestimmt (Blauert, 1997; Shinn-Cunningham et al., 1997). Folglich ist es mit Kopfhörern, die für beide Ohren identische Signale ausgeben, nicht möglich, die Position einer Schallquelle im Raum anzugeben. Bei diesen *diotischen Kopfhörern* wird die Schallquelle dann auf einer imaginalen Mittellinie des Kopfes liegend wahrgenommen. *Dichotische Kopfhörer* geben das Signal an einem Ohr entweder skaliert oder verzögert aus, so dass die Schallquelle ausgehend von der imaginalen Mittellinie als weiter links oder rechts wahrgenommen wird. Werden zudem Nachhall und Reflexionen berücksichtigt, so wird die Wiedergabe als realistischer empfunden.

Zusätzlich zu der Auswertung der Signalunterschiede zwischen beiden Ohren wird auch die spektrale Formung der Schallsignale durch das Außenohr, den Kopf und die Schulter zur räumlichen Ortung einer Schallquelle herangezogen. Um immersive dreidimensionale Tonlandschaften zu erzeugen, muss das Kopfhörersignal deshalb die exakte Schallwellenform am Trommelfell nachempfinden. Bei der Kunstkopf-Stereophonie wird zur Aufzeichnung der menschliche Kopf mit den Ohrmuscheln nachgeformt und anstelle der beiden Gehörorgane werden Mikrofone angebracht. Durch die Nachbildung der biologisch-physikalischen Eigenschaften des menschlichen Gehörsystems kann schließlich ohne Nachbearbeitung ein dreidimensionales Hörerlebnis über Kopfhörer ausgegeben werden. Da die binauralen Signale aber aufgezeichnet werden müssen und nicht in Echtzeit generiert werden können, ist diese Technik für interaktive Telepräsenzsysteme nicht geeignet. Hier ist es erforderlich, die Einwirkung des Schalls auf den Zuhörer durch individuell angepasste kopfbezogene Übertragungsfunktionen (*Head-Related-Transfer-Functions, HRTFs*) zu beschreiben. Für die Raumklangerzeugung wird das zu übertragende Schallquellensignal dann mit den entsprechenden HRTFs des rechten beziehungsweise linken Ohrs für die zu synthetisierende Einfallsrichtung des Schalls gefiltert. Um die räumliche Illusion durch die dynamische Quellenlokalisierung des menschlichen Gehörs nicht zu zerstören, ist zudem ein ‚Tracking‘ der Kopfbewegungen notwendig (Wenzel, 1992).

Kopfhörer erlauben durch die unabhängige, gezielte Ansteuerung beider Ohren eine bessere Kontrolle, allerdings sind Lautsprechersysteme vor allem in Projektionsumgebungen oftmals leichter zu implementieren. Lautsprecher, die für beide Ohren identische Signale ausgeben, ermöglichen, wie diotische Kopfhörer, keine Ortung der Schall-

quelle. Verändert man die Intensität von zwei ansonsten identischen Lautsprecher-signalen, die sich links und rechts vom Zuhörer befinden, so wird analog zum dichotischen Kopfhörer eine Phantom-Schallquelle geortet. Eine räumliche Simulation gelingt umso besser, je mehr Lautsprecher eingesetzt werden. Würde man unendlich viele Lautsprecher um den Zuhörer positionieren, so könnte man einfach den Lautsprecher an der gewünschten Position abspielen. Dieser ‚*Surround Sound*‘ wird insbesondere in der Unterhaltungsindustrie eingesetzt, wobei die Lautsprecher meistens links, rechts und mittig vor sowie links und rechts hinter dem Zuhörer positioniert werden.

Darüber hinaus können auch komplexere signalverarbeitende Methoden eingesetzt werden. Bei transauralen Lautsprechersystemen wird das Schallsignal zwischen Lautsprecher und Ohr mit den entsprechenden HRTFs gefiltert. Um ein unerwünschtes Übersprechen des linken Lautsprechers zum rechten Ohr beziehungsweise des rechten Lautsprechers zum linken Ohr zu verhindern, ist hier zusätzlich eine digitale Nachbearbeitung der Schallsignale notwendig, die auch als ‚*Crosstalk-Cancellation*‘ bezeichnet wird. Für alle Systeme gilt allerdings, dass die Wiedergabequalität nur an einer bestimmten Raumposition, dem so genannten ‚*sweet spot*‘, optimal ist (Shilling & Shinn-Cunningham, 2002).

4 Virtuelle Realität

Durch die mechanische Entkopplung von ‚*Master*‘ und ‚*Slave*‘ ist es bei Telemanipulationen notwendig, haptische Wahrnehmungen zu simulieren. In virtuellen Umgebungen müssen sogar alle Wahrnehmungsinhalte künstlich generiert werden (Kessler, 2002; Wilson et al., 2002). Bei näherer Betrachtung wird schnell bewusst, wie komplex der Arbeitsschritt ist (Abb. 9):

Zunächst muss eine *geometrische Modellierung* der virtuellen Objekte erfolgen, wobei mit Hilfe von CAD-Programmen dreidimensionale Drahtmodelle der zu simulierenden Objekte angefertigt werden, so dass unterschiedliche perspektivische Darstellungen möglich sind. Dabei wird das Objekt in geeignete grafische Primitive, wie Linien, Punkte und Polygone, zerlegt. Mit diesen kleinsten Bauteilen sind alle Objekte der virtuellen Umgebung eindeutig beschrieben.

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Zuweisung von verschiedenen Farben und Lichtquellen, indem auf die Oberflächen Texturen aus Materialbibliotheken aufgebracht

werden. In der Szene können nun auch verschiedene Beleuchtungseffekte, wie Lichtbrechungen, Spiegelungen und Reflexionen berücksichtigt werden. Zur Darstellung der dreidimensionalen Effekte wird abschließend das fertige Bild berechnet. Dieser Vorgang wird auch als ‚Rendering‘ bezeichnet.

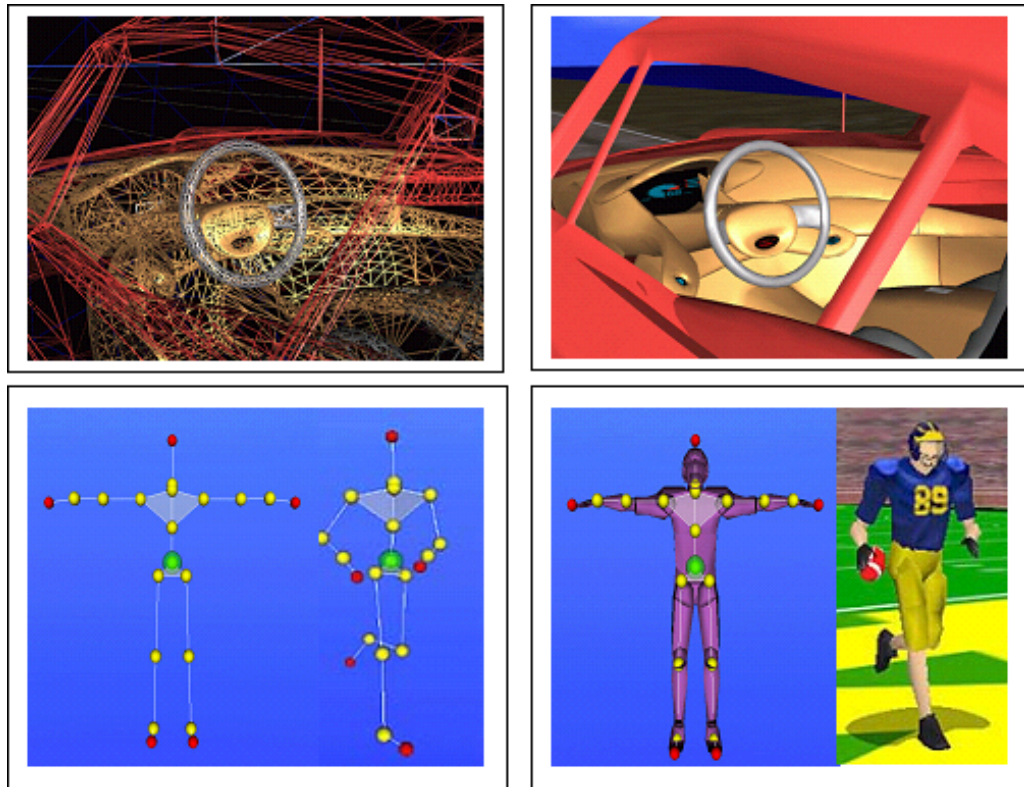


Abb. 9: Virtuelle Realität (Quelle: University of Michigan, Virtual Reality Laboratory): *Oben:* Geometrische Approximation eines Fahrzeuginnenraumes durch ein Polygonnetz (links) und das Ergebnis des Renderingprozesses (rechts) – *Unten:* Inneres Skelett mit festen Verbindungen und kreisförmig dargestellten Gelenken eines stehenden und eines laufenden Avatars (links) sowie geometrische Hülle ohne beziehungsweise mit Texturen (rechts).

Neben der geometrischen Modellierung verlangen einige Anwendungen auch die *Animation*, die Modellierung von Verhalten. So gilt es zum Beispiel in Chirurgesimulatoren die Oberflächendeformation von weichem Gewebe grafisch darzustellen. Die einzelnen Arbeitsschritte sollen am Beispiel der ‚Belebung‘ einer virtuellen Person, eines sogenannten Avatars, vorgestellt werden:

Wesentlich ist, dass alle Bewegungen über ein nicht sichtbares, inneres Skelett gesteuert werden. Ausgehend von der menschlichen Anatomie besteht auch dieses Skelett aus einer hierarchischen Struktur von Gelenken und Knochenverbindungen. Während der Simulation werden alle Positions- und Gelenkwinkeländerungen erfasst und die entsprechende Bewegung aus einer Bibliothek mit Hunderten von definierten Posen aufge-

rufen. Die besondere Herausforderung besteht darin, die Bewegung an die momentane Bewegungsgeschwindigkeit anzupassen und fließende Übergänge zwischen den einzelnen Posen zu realisieren.

Um das Skelett wird abschließend die Geometrie des Avatars als sichtbare dreidimensionale Hülle modelliert. Damit sich die Lageänderungen des Skeletts auf die Geometrie auswirken, ist diese in einzelne Segmente unterteilt, die bestimmten Abschnitten des Skeletts zugeordnet sind.

Der Modellierungsprozess ist nicht auf die optische Darstellung beschränkt, sondern lässt sich auch auf den haptischen Kanal erweitern. Eine wichtige Funktion haptischer Renderalgorithmen ist die *Kollisionserkennung*, wie sie zum Beispiel beim Greifen von Objekten notwendig ist. Finden Kollisionen statt, so können die auftretenden Kräfte ermittelt und dem Benutzer rückgemeldet werden. Ebenso lassen sich Oberflächendeformationen grafisch darstellen.

Die Kraftberechnung basiert auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten (1). Geht man in einem einfachen Fall von einem einzigen Kontaktpunkt aus, so lässt sich der Zusammenhang durch das Hookesche Gesetz abbilden. Danach baut sich die Normalkraft F_n proportional zum Steifigkeitskoeffizienten k eines Objektes und der Eindringtiefe Δx auf (Burdea, 1999):

$$F_n = k_{\text{Objekt}} \cdot \Delta x \quad (1)$$

Dabei handelt es sich aus drei Gründen um eine starke Vereinfachung: Die punktbasierte Methode bietet lediglich eine Krafrückmeldung, wie man sie bei einer Exploration realer Objekte mit der Spitze eines Stiftes spüren würde. Existieren mehrere Kontaktpunkte, wie bei der Berührung mit einem Finger oder einer Hand, so muss das Hookesche Gesetz erweitert werden. Weiterhin wird vereinfachend vorausgesetzt, dass sich das Objekt isotrop verhält. Meistens sind Härtezustände aber nicht gleichbleibend, sondern es ergeben sich komplexere Kraftmuster: Bei der Bedienung eines Drucktasters fühlt man zum Beispiel einen elastischen Widerstand, die Kräfte nehmen bis zu einer bestimmten Schwelle linear zu und fallen dann ab. Schließlich sind viele Objekte weder elastisch noch plastisch; metallische Fertigungsteile zum Beispiel deformieren unter normalen Manipulationskräften nicht. Diese harten Kontaktempfindungen lassen sich nicht durch ein Hookesches Federmodell abbilden. Bedingt durch die digitale Positionserfassung nimmt die Kraft, anders als bei einer realen Feder, diskret und nicht kontinu-

ierlich zu. Dadurch ist die durchschnittliche Kraft beim Drücken geringer als bei einer physikalischen Feder mit vergleichbarer Steifigkeit, während sie bei der Entspannung etwas höher ist. Als Nettoresultat generiert die virtuelle Feder Energie, die als Instabilitäten wahrgenommen werden. Damit erscheinen harte Kontaktflächen aktiv oszillierend und nicht passiv wie reale Kontakte. Um diesen so genannten ‚Sample-and-Hold‘ Artefakten entgegenzuwirken, muss das Hookesche Gesetz um einen mathematischen Ausdruck erweitert werden, den man physikalisch als Dämpfung bezeichnen würde (Burdea, 1999).

Zur Verbesserung des Realitätseindrucks sollten aber nicht nur Kollisionskräfte, sondern auch Oberflächendetails modelliert werden (2). Geht man wiederum von dem vereinfachten Fall eines einzigen Kontaktpunktes aus, so wirken beim Streichen entlang einer Oberfläche drei Kräfte auf den Benutzer: Erstens, die Normalkraft F_n , wie sie durch das Hookesche Gesetz ausgedrückt wird. Zweitens, die Coloumbsche Reibung F_r , die sich mit einem bestimmten Reibungskoeffizienten μ entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung aufbaut. Drittens, die Textur, deren Kraft F_t durch systematische Änderung der Höhe und Richtung des Normalkraftvektors am Kontaktpunkt simuliert wird (Basdogan & Srinivasan, 2002):

$$F_{\text{Benutzer}} = F_n + F_r + F_t, \text{ wobei } F_r = \mu \cdot F_n \quad (2)$$

Selbst wenn diese zusätzlichen Kräfte berücksichtigt werden, handelt es sich immer noch um eine vereinfachte Abbildung der Realität, mit der sich lediglich die Form und die Oberfläche eines Objektes modellieren lassen. Bei einer gelungenen haptischen Modellierung sollten aber auch physikalische Gegebenheiten, wie Gravitationskräfte, umgesetzt sein.

III Gestaltungskriterien

Eine Abbildung der Realität in einer virtuellen Umgebung stößt schnell an ihre Grenzen. Ebenso ist auch die Überwindung der räumlichen Barriere zwischen Telemanipulator und Benutzer mit einer Reihe technischer Schwierigkeiten verbunden. Die Herausforderung bei der Gestaltung von Telepräsenzsystemen wird deshalb bereits durch den Begriff impliziert, und besteht darin, die räumliche Barriere zwischen Eingabe- und Ausführungsraum in der Wahrnehmungswelt des Operators zu überwinden und Präsenzerleben hervorzurufen. Witmer und Singer (1998; S. 225) beschreiben das Gestaltungsziel folgendermaßen:

„Presence is defined as the subjective experience of being in one place or environment, even one is physically situated in another. As described by teleoperators, presence is the sensation of being at the remote worksite rather than at the operator’s control station. As applied to a virtual environment, presence refers to experiencing the computer-generated environment rather than the actual physical locale.“

Präsenzepfinden wird häufig einfach auch auf die Formel „*sense of being there*“ gebracht (Slater, 1999; S. 560).

1 Präsenzepfinden

Bislang liegt keine abgeschlossene Modellvorstellung des Telepräsenzkonstruktes vor (Ijsselsteijn et al., 2000). Vor dem Hintergrund einer ergonomischen Fragestellung ist aber insbesondere das Telepräsenzmodell von Steuer (1995) hervorzuheben (Abb. 10): Der Präsenzeindruck setzt sich demnach aus der Interaktivität und der sensorischen Reichhaltigkeit der Telepräsenzumgebung zusammen. Beide Variablen lassen sich weiter differenzieren:

Die *sensorische Reichhaltigkeit* (vividness) hängt von der sensorischen Breite (breadth) und der sensorischen Tiefe (depth) ab. Damit sind die Anzahl der beteiligten Sensormodalitäten und deren Umfang gemeint. Demnach gewinnt ein System zum Beispiel an sensorischer Breite, wenn es neben visueller auch haptische Rückmeldung bietet; sowie an haptischer Tiefe, wenn es nicht nur Kraftfeedback, sondern auch taktilen Feedback bereitstellt.

Die *Interaktivität* (interactivity) wird durch die Reaktionszeit des Systems (speed) beeinflusst, sowie durch das Ausmaß (range), in dem Form und Inhalte der Telepräsenz-

umgebung durch den Benutzer verändert werden können. Interaktivität bezieht sich schließlich auch auf die Umsetzung von Eingabekommandos im Telepräsenzsystem (mapping). Dabei gilt es, alle Eingaben für den Benutzer vorhersehbar abzubilden, sowie Eingabemetaphern zu wählen, die als natürlich empfunden werden und zu den erforderlichen Aktionen passen (siehe Norman, 2002).

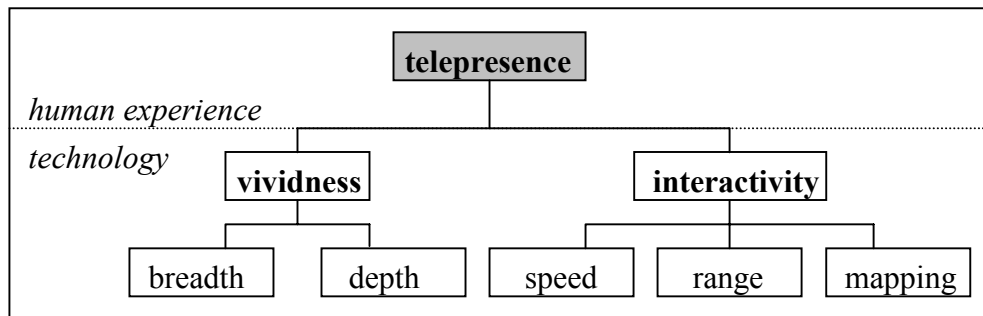


Abb. 10: Telepräsenzmodell (nach Steuer, 1995): Das Telepräsenzepfinden variiert mit der sensorischen Reichhaltigkeit und der Interaktivität eines technischen Systems.

Wenngleich sensorische Reichhaltigkeit und Interaktivität zentrale Elemente der meisten Telepräsenztheorien darstellen, ist das Telepräsenzmodell von Steuer (1995) nicht vollständig. Das Modell beschränkt sich auf Systemparameter, welche die Ein- und Ausgabe betreffen, und kann durch andere Arbeiten ergänzt werden, die auch den Einfluss von Personenparametern (Heeter, 1992; Slater & Usoh, 1993; Schubert et al., 1999) oder von Aufgabenparametern (Sheridan, 1992; Draper et al., 1998) berücksichtigen.

Wegen des Fehlens einer einheitlichen Theorie ist die Operationalisierung des Präsenzkonstruktes in messbare, und damit beschreibbare Komponenten, unabdingbar (Insko, 2003). *Telepräsenzmaße* können danach unterschieden werden, ob es sich um objektive oder um subjektive Methoden handelt:

a) objektive Telepräsenzmaße

Alle Vorgehensweisen, die auf eine Auskunft des Anwenders verzichten, werden als objektive Methoden zusammengefasst. Diese Erhebungsmethoden werden in der Regel zur Unterstützung eines subjektiven Verfahrens eingesetzt und ermöglichen ein besseres Verständnis der physiologischen, kognitiven und sensomotorischen Faktoren, die das Telepräsenzepfinden bedingen.

Einigen Ansätzen liegt zum Beispiel die Annahme zu Grunde, dass Telepräsenzempfinden ein bestimmtes Erregungsniveau voraussetzt. Diese Arbeiten erheben *physiologische Korrelate*, wie Veränderungen der Herzrate (Meehan et al., 2002), der Hautleitfähigkeit (Salnäss, 1999) oder berücksichtigen kortikale Aktivitäten, wie sie im EEG sichtbar sind (Schlögl et al., 2002). Erste empirische Befunde sprechen für die Validität des Vorgehens, da ein positiver Zusammenhang zwischen physiologischen und subjektiven Präsenzmessungen aufgezeigt werden konnte (Wiederhold & Jang et al., 2001).

Wenngleich physiologische Telepräsenzmessungen den Vorteil einer hohen Zeitauflösung aufweisen, sind sie mit zwei erheblichen Nachteilen behaftet: Zum einen kann bereits die Messung reaktiv sein und zum Beispiel die Ableitung eines EEGs das Präsenzempfinden beeinflussen. Zum anderen lassen sich physiologische Daten oftmals nur schwer psychologisch bedeutsam interpretieren.

Eine andere Möglichkeit der objektiven Telepräsenzmessung stellt die weit verbreitete *Methode der Nebenaufgabe* dar (Draper et al., 1998). Dabei wird folgende Annahme getroffen: Je höher der Telepräsenzeindruck ist, umso mehr Aufmerksamkeit wird der computergenerierten Umgebung zugewandt. Da menschliche Aufmerksamkeitsressourcen begrenzt sind, würde sich ein hohes Telepräsenzerleben indirekt als Fehler- beziehungsweise Reaktionszeitzunahme in einer zweiten Aufgabe niederschlagen (siehe Färber, 1987). Eine Untersuchung von Darken et al. (1999) bestätigte diese Vermutung und zeigte einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Aufmerksamkeitsniveau und dem mittels Fragebogen erhobenen Präsenzempfinden auf.

Ein weiteres Verfahren ist der Ansatz des „*behavioral realism*“ (Wilson et al., 1997; Freeman et al., 2000; S. 151). Dabei handelt es sich um eine Verhaltensmessung, die auf folgender Annahme beruht: Je besser ein System die Wirklichkeit repräsentiert, umso natürlicher wird sich der Anwender verhalten. Als Indikatoren für das Präsenzempfinden werden Reflexe, wie das Ausweichen vor virtuellen Objekten, oder sozial konditionierte Antworten, wie Lächeln, erhoben. Da soziale Interaktionen an Telearbeitsplätzen oftmals nicht vorgesehen sind, ist das Verfahren hier allerdings nur beschränkt einsetzbar.

b) subjektive Telepräsenzmaße

Da sich das Präsenzepfinden auf eine subjektive Erfahrung bezieht, stellt die Befragung eine direkte und auch die gebräuchlichste Erhebungsmethode dar.

Einige Arbeiten basieren auf *psychophysischen Methoden* (Barfield et al., 1995; Welch et al., 1996; Sheridan, 1996): Snow und Williges (1998) haben zum Beispiel die psychophysische Methode der frei-modulierbaren Größenschätzung auf die Messung von Telepräsenz angewandt. Dabei wurden die Anwender gebeten, jedem Stimulus entsprechend seiner subjektiven Präsenzepfindung eine Zahl zuzuordnen. Schloerb (1995) diskutiert die Methode des Paarvergleichs und schlägt vor, reale und computergenerierte Szenen zu präsentieren, die beide hinsichtlich einzelner Wahrnehmungsparameter, wie Farbe, Kontrast und Geräusche verändert sind. Als Maß für das Präsenzepfinden kann dann die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Identifikation herangezogen werden. Allerdings scheint die Validität der Methode fraglich: Wird damit der Grad des Eintauchens in eine medial vermittelte Umgebung gemessen oder einfach das Ausmaß, in dem der Benutzer zwischen zwei verzerrten Bildern unterscheiden kann?

In den meisten Arbeiten werden *Ratingskalen* eingesetzt (z.B. Barfield & Weghorst, 1993; Hendrix & Barfield, 1996; Usoh et al., 2000; Lessiter et al., 2001).

Hierzu liegen eine Vielzahl von Verfahren vor, deren Items inhaltlich größtenteils übereinstimmen. An der Benennung der Faktoren wird allerdings offensichtlich, dass bislang keine abgeschlossene Modellvorstellung von Telepräsenz vorliegt: Witmer und Singer (1998) unterscheiden Steuerungs-, Sensor-, Distractions- und Realismusfaktoren; Kalawsky (2000) spricht von Form-, Inhalts- und Mediennutzervariablen; Schubert et al. (2001) differenzieren zwischen Raum-, Aufmerksamkeits- und Realitätskomponenten; Scheuchenpflug (2001) schließlich kategorisiert nach Schnittstellenqualität, Motivation und räumlicher Präsenz.

Die vorliegende Arbeit will keinen Beitrag zur Modellbildung des Präsenzkonstruktes leisten, sondern Richtlinien zur effektiven Schnittstellengestaltung erarbeiten. Aus dem Grund wurden in den folgenden empirischen Untersuchungen keine objektiven Präsenzmaße erhoben, sondern das Präsenzerleben der Teilnehmer ausschließlich mit Hilfe eines Ratingverfahrens erfasst.

2 Performanz

Während Präsenzzempfinden bei Unterhaltungsmedien einen Selbstzweck darstellt, ist an Telearbeitsplätzen vor allem der Bezug zur Aufgabenleistung entscheidend. Vielfach wird eine positive Beziehung zwischen Präsenzerleben und Performanz unterstellt und argumentiert, dass hohes Präsenzzempfinden eine natürlichere und damit auch erfolgreichere Aufgabenausführung bewirke. Der Zusammenhang gilt aber als empirisch nicht eindeutig geklärt (Bystrom et al., 1999; Welch, 1999; Nash et al., 2000):

In einigen Untersuchungen wurde ein positiver Korrelationszusammenhang zwischen Präsenzerleben und Performanz beobachtet (Witmer & Singer, 1994; Youngblut & Hui, 2003). Da aus einer Korrelationsbeziehung noch nicht auf die Richtung des Zusammenhangs geschlossen werden kann, gilt es zunächst zu klären, ob hohes Präsenzzempfinden zu hoher Performanz führt oder ob eine umgekehrte Beziehung vorliegt. Vor dem Hintergrund der Schnittstellengestaltung ist die Frage der Kausalität entscheidend: Es macht nur dann Sinn, eine telepräsente Schnittstellengestaltung zu forcieren, wenn sich das Präsenzerleben auch als ursächlich für die Performanz erweist.

Erwähnenswert ist auch, dass nicht alle Untersuchungen einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Präsenzerleben und Performanz aufzeigen konnten (Singer et al., 1995; Witmer et al., 1996). Einige Autoren vermuten deshalb einen komplexen Zusammenhang zwischen beiden Parametern, der durch andere Variablen moderiert werde. (IJsselsteijn et al., 2000; Mania & Chalmers, 2001; Sadowski & Stanney, 2002). Empirische Belege für diese Annahme fehlen allerdings weitgehend. Da Schnittstellen nur dann effektiv gestaltet werden können, wenn diese Moderatorvariablen bekannt sind, werden im Folgenden zunächst mögliche Faktoren diskutiert und deren Bedeutung dann empirisch untersucht.

IV Gestaltungsaspekte

Um die Mensch-System-Schnittstelle effektiv zu gestalten, müssen zum einen differentialpsychologische Unterschiede zwischen den Anwendern diskutiert werden. Zum anderen gilt es, allgemeinspsychologische Aspekte, wie die Funktionsweise des motorischen, sensomotorischen und sensorischen Systems, zu berücksichtigen.

Die Behandlung der einzelnen Gestaltungsaspekte orientiert sich an folgendem Vorgehen: In einem Literaturüberblick werden zunächst jeweils relevante Methoden und einschlägige empirische Untersuchungen dargelegt. Darauf aufbauend werden weiterführende Fragestellungen beziehungsweise Hypothesen abgeleitet, die den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen zugrunde liegen. Um schließlich Gestaltungsrichtlinien für die Mensch-Telepräsenzsystem-Schnittstelle zu generieren, werden relevante Ergebnisse herausgearbeitet und in Form von Gestaltungsaussagen zusammengefasst.

1 Differentialpsychologische Aspekte

Bislang wurde von *den* Anwendern als einer homogenen Gruppe gesprochen. Diese Vereinfachung ist nicht immer gerechtfertigt:

Bei einer ‚Trackingaufgabe‘ in einer virtuellen Umgebung beobachteten Smith et al. (2000), dass selbst mit dem gleichen Eingabegerät drei verschiedene Auge-Hand-Koordinationsstrategien eingesetzt wurden: Bei einer Gruppe folgte die Augenbewegung dem Objekt auf das Ziel hin, bei einer anderen Gruppe führte die Augenbewegung das Objekt zum Ziel und bei einer weiteren Gruppe sprang das Auge zwischen Objekt und Ziel hin und her.

Ähnliche interindividuelle Unterschiede beobachteten Zhai et al. (1997) bei der Steuerung eines Eingabegerätes: Während 77 Prozent der Versuchspersonen das Eingabegerät sicher kommandieren konnten, waren 15 Prozent nicht in der Lage, Drehbewegungen auszuführen. Den restlichen 8 Prozent gelang auch nach einer 40-minütigen Übungsphase keine sichere Interaktion.

1.1 Sensomotorische Fähigkeiten

Die Beobachtungen von Smith et al. (2000) und Zhai et al. (1997) lassen sich erst sinnvoll interpretieren, wenn man die sensomotorischen Fähigkeiten der Anwender berücksichtigt. Bislang liegen allerdings keine empirischen Untersuchungen diesbezüglich vor und es ist unklar, welche Fähigkeitsaspekte für einen erfolgreichen Umgang mit Telepräsenzsystemen als ‚Schlüsselfaktoren‘ zu bezeichnen sind.

Sensomotorische Fähigkeiten umfassen neben der Auge-Hand- und der Hand-Hand-Koordination auch das gedankliche Vorwegnehmen, die Antizipation, von Bewegungen (Birbaumer & Schmidt, 2003). Zur Erfassung der Personenvariable stehen eigens entwickelte Testinstrumente, wie das *Wiener Testsystem*, zur Verfügung (Gaschok, 2002). Die Testvorgabe erfolgt computerbasiert, wobei zur Eingabe eine Probandentastatur mit Farbtasten und zwei Joysticks zu Verfügung stehen. Für die nachfolgenden empirischen Untersuchungen wurde folgende Testbatterie zusammengestellt (Abb. 11):

Die Diagnose der Auge-Hand-Koordination erfolgt mit dem *Sensomotorischen Koordinationstest* (SMK). Auf dem Bildschirm wird hierzu ein perspektivischer Raum dargestellt, in dem sich ein Balkenkreuz als Ziel und ein Kreissegment als Steuerobjekt befindet. Das auf der Spitze stehende Kreissegment beginnt Dreh-, Horizontal-, und Tiefenbewegungen mit entsprechenden Größenveränderungen auszuführen. Die Bewegungen sind unvorhersehbar, aber für alle Testpersonen gleich. Der Proband hat die Aufgabe, mit den Joysticks derart gegenzusteuern, dass das Kreissegment vertikal auf dem Balken zu stehen kommt (Prieler, 2002).

Der *2Hand Test* erfasst, wie der Name bereits impliziert, die Hand-Hand-Koordination der Teilnehmer. Der Proband bewegt dabei mit Hilfe von zwei Joysticks eine Marke entlang einer am Bildschirm vorgegebenen Bahn. Mit dem rechten Joystick kann die Marke in horizontaler Richtung bewegt werden; mit dem linken Joystick kann sie vertikal gesteuert werden. Die Bahn besteht aus drei Abschnitten, die unterschiedliche Anforderungen an die Koordination von linker und rechter Hand stellen (Puhr, 2001).

Das Ausmaß, in dem eine Person bewegte Objekte im Raum richtig einschätzen kann, lässt sich durch den Test zur *Zeit- und Bewegungsantizipation* (ZBA) messen. Auf dem Bildschirm erscheint eine Kugel, die zunächst einfache Linearbewegungen, dann kurvilineare Bahnen und schließlich Sinuskurven beschreibt. Zu einem unvorhergesehenen Zeitpunkt verschwindet die Kugel und es erscheinen zwei Linien. Die eine befindet sich

an der Stelle, an der die Kugel eben verschwand; bei der anderen handelt es sich um eine Zeitlinie, an welcher der Zeitpunkt des Auftauchens der Kugel anzugeben ist. Hierzu drückt der Proband in dem Augenblick auf eine Taste, in dem er meint, dass die Kugel die zweite Linie erreicht haben sollte. Um neben der Zeit- auch die Bewegungsantizipation zu erfassen, wird die Versuchsperson außerdem gebeten, mit einem Pfeil die Stelle anzugeben, an der die Kugel hätte auftauchen müssen (Neuwirth, 2002).

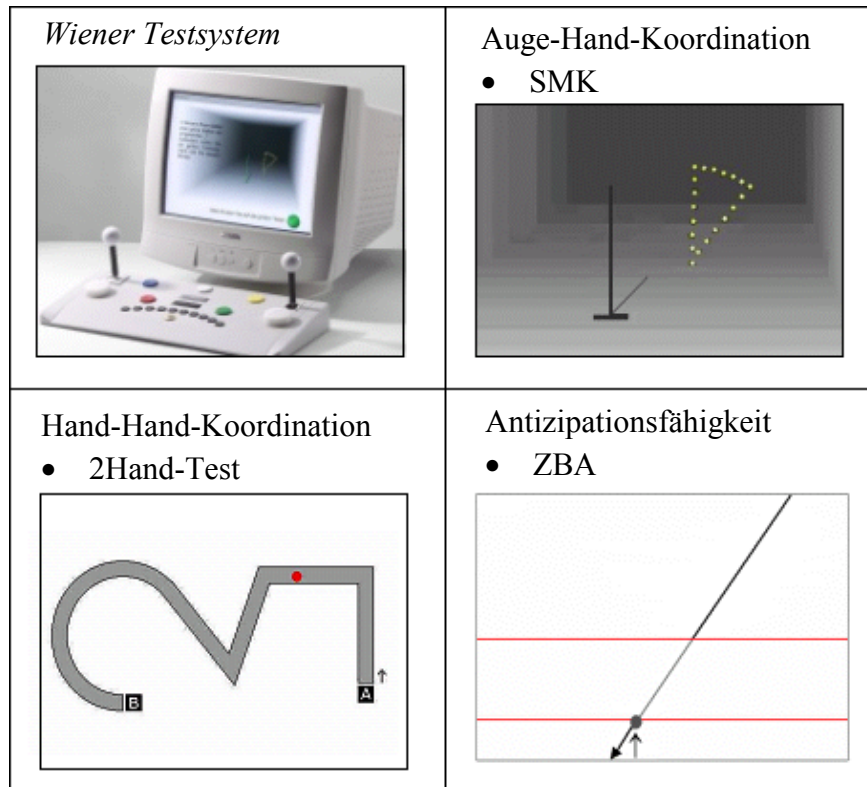


Abb. 11: Wiener Testsystem (Schuhfried GmbH): *Links oben:* Zur Bearbeitung der sensomotorischen Koordinationstests steht dem Probanden ein spezielles Eingabepanel zur Verfügung. – *Rechts oben:* Die Diagnose der Auge-Hand Koordination erfolgt mit dem Sensomotorischen Koordinationstest, wobei sieben Subskalen erfasst werden: Zeit im Idealbereich, Mittelwert der Winkelabweichung, Mittelwert der Horizontalabweichung, Mittelwert der Vertikalabweichung, Streuung der Winkelabweichung, Streuung der Horizontalabweichung, Streuung der Vertikalabweichung – *Links unten:* Der 2Hand-Test wertet vier Subskalen zur Hand-Hand Koordination aus: Mittlere Dauer Gesamt, Mittlere Fehlerdauer, Prozentuale Fehlerdauer, Koordinationserschwerwis (auf die Weglänge normierte Zeitdifferenz zwischen Abschnitten mit und ohne Koordinationsanforderung). – *Rechts unten:* Der Test zur Zeit- und Bewegungsantizipation misst schließlich zwei Subskalen: Median des Zeitfehlers, Median des Bewegungsfehlers.

1.2 Immersionsbereitschaft

Während der Begriff ‚Immersion‘ die Qualität der Displaytechnologie beschreibt, bezeichnet ‚*Immersionsbereitschaft*‘ einen kognitiven Wahrnehmungsparameter, der ausdrückt, wie stark sich der Benutzer mit Ereignissen in Telepräsenz Anwendungen identifiziert und bereit ist, in diese einzutauchen. Die meisten Untersuchungen, die differentialpsychologische Aspekte im Zusammenhang mit Telepräsenzsystemen betrachten, berücksichtigen keine sensomotorischen Fähigkeiten, sondern beschränken sich ausschließlich auf die Immersionsbereitschaft der Anwender. Dabei wird in der Regel allerdings nur die Bedeutsamkeit für das Präsenzerleben diskutiert und der Einfluss auf die Aufgabenausführung ausgeblendet.

Zur Messung des Konstruktes haben Witmer und Singer (1998) einen Fragebogen (*Immersive Tendencies Questionnaire*, ITQ) mit 34 Items entwickelt, der auf einer siebenstufigen Ratingskala basiert. In deutscher Sprache liegt eine gekürzte Version vor, die in den nachfolgenden empirischen Untersuchungen eingesetzt wurde (Scheuchenpflug, 2001). Die Items erfassen das „Involvement“ (Witmer & Singer, 1998; S. 227), mit dem sich ein Anwender einem alltäglichen Szenario zuwendet. Im Gegensatz zur gleichnamigen Skala im Präsenzfragebogen wird hier nicht die aktuelle Bereitschaft zur Involvierung erfasst, sondern eine konstante Persönlichkeitseigenschaft. So interessiert zum Beispiel das individuelle Engagement beim Fernsehen, beim Lesen eines Buches oder beim Verfolgen von Sportveranstaltungen.

Der ITQ wurde bereits in einer Reihe von Studien eingesetzt. Blake et al. (2000) untersuchten zum Beispiel den Einfluss der Immersionsbereitschaft auf das Präsenz- und auf das Co-Präsenzempfinden. Co-Präsenz bezieht sich auf Telepräsenzumgebungen, in denen mehrere Personen anwesend sind. Der Einzelne empfindet sich dabei als Teil einer Gruppe und ist sich darüber bewusst, mit realen Personen zusammenzuarbeiten. Jeder Teilnehmer wurde in dem Experiment durch einen farbigen Avatar (rot, grün, blau) repräsentiert und die Aufgabe bestand darin, verschiedene geometrische Figuren (Pyramiden, Würfel, Quader) nach ihrer Form zu sortieren. Alle Formen waren farblich markiert und zudem durch ein farbiges Schloss verriegelt. Nur der Avatar in der Farbe des Schlosses konnte eine Form für sechs Sekunden entriegeln und nur der Avatar in der Farbe der Form konnte die Figur schließlich sortieren.

Obwohl in der Untersuchung ein anderes Präsenzmaß (Slater et al., 1998) als bei Witmer und Singer (1998) verwendet wurde, war das individuelle Präsenzempfinden mit

den ITQ-Werten korreliert. Die Tatsache, dass sich ein Zusammenhang zwischen der Immersionstendenz und dem Präsenzerleben mit verschiedenen Messmethoden aufzeigen lässt, impliziert, dass es sich nicht nur um ein Artefakt einer bestimmten Skala handelt. Immersionsbereitschaft scheint demnach eine individuelle Voraussetzung für das Präsenzerleben darzustellen, wobei folgender Zusammenhang zu gelten scheint: Je höher die Immersionsbereitschaft einer Person, umso höher ist in der Regel auch ihr Präsenzerleben.

1.3 Empirische Untersuchung

Da differentialpsychologische Aspekte in der Telepräsenzforschung meist ausgeblendet wurden, sind folgende Fragen bislang unbeantwortet:

- F_{D1} Wirkt sich die Immersionsbereitschaft eines Anwenders auch auf dessen Performance aus oder beschränkt sich die Bedeutung der PersonenvARIABLE einzig auf das Präsenzerleben?
- F_{D2} Welche sensomotorischen Fähigkeitsaspekte sind für die Interaktion mit Telepräsenzsystemen erfolgsrelevant und können deshalb als ‚Schlüsselfaktoren‘ bezeichnet werden?
- F_{D2} Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Präsenzerleben und der beobachteten Aufgabenleistung? Liegt ein Kausalzusammenhang vor?

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Szenarien zur Untersuchung motorischer (N=11, S. 46ff), sensomotorischer (N=25, S. 64ff) und sensorischer (N=60, S. 78) Fragestellungen aufgebaut. Dabei wurden vor Beginn des eigentlichen Experimentes alle Teilnehmer gebeten, die drei Verfahren des Wiener Testsystems sowie den Immersionsfragebogen zu bearbeiten.

Als abhängige Variablen wurden das Präsenzerleben und die Bearbeitungszeit in der nachfolgenden Experimentalaufgabe herangezogen:

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Experimenten herzustellen, wurden die Zeiten jeweils von eins (sehr schnell) bis fünf (sehr langsam) kategorisiert.

Das Präsenzerleben wurde in allen Untersuchungen mit Hilfe des Ratingverfahrens von Scheuchpflug (2001) erhoben. Da das Instrument vor dem Hintergrund einer ergonomischen Fragestellung entwickelt worden ist und die Items größtenteils aus anderen Verfahren abgeleitet sind, erwies es sich hier als besonders geeignet. Dem Fragebogen liegt eine siebenstufige Ratingskala zu Grunde; die Skalenreliabilität kann als hoch

bezeichnet werden und beträgt 0.85 (siehe Bortz & Döring, 2002). Das Verfahren erfasst drei faktorenanalytisch ermittelte Aspekte des Präsenzerlebens: Der erste Faktor erhebt die subjektiv empfundene Qualität der Ein- und Ausgabegeräte. Die Items des zweiten Faktors fragen nach der aktuellen Motivation und der Involvierung der Anwender. Der dritte Faktor ermittelt schließlich, inwieweit es dem Benutzer gelingt, seine Aufmerksamkeit auf den Ausführungsraum beziehungsweise die virtuelle Umgebung zu fokussieren.

Da verschiedene Aufgaben mit unterschiedlichen Ein- und Ausgabegeräten bearbeitet wurden und die Teilnehmer unterschiedlichen Berufs- und Altersgruppen angehörten, war es möglich, die Fragen extern valide zu beantworten.

1.3.1 Ergebnisse

Um für Telepräsenzsysteme relevante Personenvariablen zu identifizieren wurden die Testwerte der Voruntersuchung mit der im Experiment ermittelten Bearbeitungszeit und dem berichteten Präsenzerleben korreliert. Da signifikante Korrelationsergebnisse aufgrund der großen Stichprobe nicht aussagekräftig sind, wurden nur die Variablen näher betrachtet, die den Anforderungen einer linearen Regression genügten und signifikant¹ zur Varianzaufklärung der abhängigen Variablen beitrugen:

Mit dieser Einschränkung trug lediglich die Immersionsbereitschaft signifikant² zur Aufklärung der Präsenzstreuung bei, wobei 21 Prozent der Varianz aufgedeckt wurden. Zudem zeichnete sich ein geringer Korrelationszusammenhang zwischen der Immersionsbereitschaft eines Anwenders und der benötigten Bearbeitungszeit ab; die Beziehung kann allerdings nicht als statistisch signifikant³ bezeichnet werden. Folglich stellt die Immersionsbereitschaft nur einen geeigneten Indikator dar, um das Präsenzerleben eines Anwenders zu prognostizieren, erlaubt jedoch noch keine Aussage über den Erfolg der Aufgabenausführung (F_{DI}).

Die Bearbeitungszeit ließ sich durch drei Variablen robust vorhersagen, die insgesamt 45 Prozent der Varianz aufklärten: Die Ausführung wurde zum einen vom Alter der Probanden beeinflusst, wobei jüngere Teilnehmer wesentlich schneller waren als ältere.

¹ Alle folgenden Endnoten verweisen auf relevante statistische Prüfgrößen, die im Anhang (S. 136ff) aufgeführt sind.

Zum anderen bewirkten insbesondere zwei sensomotorische Parameter eine schnelle Bearbeitung, nämlich die Fähigkeit, die Bewegung von Objekten sicher antizipieren zu können und die Fähigkeit, Drehbewegungen stabil koordinieren zu können.

Die Antizipationsfähigkeit bezog sich ausschließlich auf eine adäquate räumliche Bewegungsschätzung; die Zeitantizipation, die ebenfalls erfasst wurde, war als Prädiktor nicht geeignet. Ebenso erwies sich lediglich die Koordination von Drehbewegungen als stabiler Prognoseindikator, während die Koordination von Horizontal- und Tiefenbewegungen sowie die Hand-Hand-Koordination weniger aussagekräftig waren (F_{D2}).

Betrachtet man alle Experimente zusammen, so konnte außerdem ein signifikanter⁴ Zusammenhang zwischen dem Präsenzerleben und der Bearbeitungszeit aufgezeigt werden. Dabei ist zunächst unklar, ob hohes Präsenzepfinden zu hoher Performanz führt oder ob ein umgekehrter Zusammenhang vorliegt. Eine gerichtete Interpretation wird erst durch folgende Beziehung möglich:

Die Immersionsbereitschaft eines Anwenders korreliert sowohl mit dem Präsenzerleben als auch geringfügig mit der beobachteten Performanz. Demgegenüber variieren die Bewegungsantizipation und die Koordination von Drehbewegungen zwar signifikant⁵ mit der Performanz, nicht aber mit dem Präsenzerleben. Eine erfolgreiche Aufgabenausführung kann folglich auch ohne ein hohes Präsenzepfinden auftreten und der beobachtete Zusammenhang kann deshalb nur von der Präsenz- zur Performanzvariable führen, wobei 16 Prozent der Leistungsvarianz durch die Präsenzvariable aufgeklärt wurden (F_{D3}). Den Zusammenhang der differentialpsychologischen Aspekte visualisiert Abbildung 12:

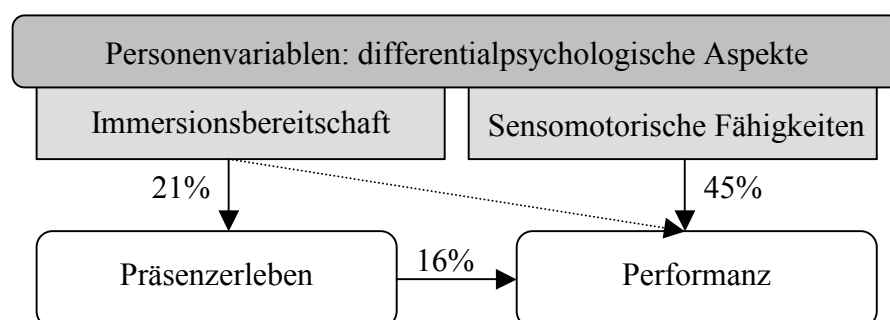


Abb. 12: Differentialpsychologische Aspekte in Telepräsenzsystemen.

1.3.2 Diskussion

Die Immersionsbereitschaft, die in vielen Arbeiten als zentrale Personenvariable für Telepräsenzsysteme diskutiert wird, stellt in diesen Untersuchungen lediglich eine individuelle Voraussetzung für das Präsenzerleben, nicht aber für die resultierende Performanz dar. Da sich das Präsenzerleben aber nur zu 21 Prozent aus der Immersionsbereitschaft eines Anwenders prognostizieren ließ, dürfte das Präsenzempfinden stärker von Umwelt- als von Personenvariablen abhängig sein. Folglich ist eine hohe Immersionsbereitschaft für Anwendungen, die ein hohes Präsenzerleben erfordern (z.B. virtuelle Psychotherapie), zwar förderlich, aber keine notwendige Voraussetzung (F_{D1}).

In den Experimenten konnte die Performanz, operationalisiert durch die Bearbeitungszeit, fast zur Hälfte aus dem Alter der Probanden sowie deren Fähigkeit zur Bewegungsantizipation und zur Koordination von Drehbewegungen prognostiziert werden. Aufgrund der hohen Bedeutung individueller Fähigkeiten kann es für einige Anwendungen sinnvoll sein, die Benutzer entsprechend dieser ‚Schlüselfaktoren‘ auszuwählen oder zu trainieren. Das Ergebnis lässt sich aber auch für die Schnittstellengestaltung nutzen: Da insbesondere Drehungen motorisch anspruchsvoll erscheinen, sollten Telearbeitsplätze so konzipiert sein, dass Rotationsbewegungen möglichst leicht auszuführen sind (siehe motorische Aspekte). Außerdem sollte eine direkte Abbildung (siehe sensomotorische Aspekte) zwischen Ein- und Ausgabe vorliegen, so dass Veränderungen offensichtlich sind und lediglich eine geringe Bewegungsantizipation erforderlich ist (F_{D2}).

In allen Experimenten wurde eine positive korrelative Beziehung zwischen dem Präsenzerleben und der Performanz beobachtet. Ein hohes Präsenzerleben wirkte sich dabei ursächlich auf die Performanz aus, während der umgekehrte Zusammenhang empirisch nicht bestätigt wurde. Aus diesem Grund scheint es sinnvoll, nicht nur in Unterhaltungsmedien, sondern auch in Arbeitsumgebungen Maßnahmen zu ergreifen, die das Präsenzempfinden der Anwender unterstützen. Konkrete Gestaltungsempfehlungen lassen sich dabei aus den Subskalen des Präsenzfragebogens ableiten. So kann es zum Beispiel sinnvoll sein, die Benutzer für die Anwendung zu motivieren oder Störquellen abzuschalten (F_{D3}).

1.4 Zusammenfassung

Präsenzempfinden und Performanz hängen sowohl von der Gestaltung eines Telepräsenzsystems als auch vom individuellen Erleben und Verhalten der Anwender ab:

- Telepräsenzerleben wirkt sich förderlich auf die Performanz aus und sollte deshalb nicht nur in Unterhaltungsmedien, sondern auch in Arbeitsplatzumgebungen angestrebt werden: Personen, die über Immersionsbereitschaft, und damit über eine hohe Involvierung im Umgang mit Medien verfügen, äußern höheres Präsenzempfinden. Da das Präsenzerleben aber stärker von Umwelt- als von Personenvariablen abhängt, kann eine niedrige Immersionsbereitschaft durch die Motivation der Anwender, das Abschalten von Störquellen und die Präsentation einer hochwertigen Schnittstelle kompensiert werden.
- Der Einfluss des Präsenzempfindens auf die Performanz darf allerdings nicht überbewertet werden, da sensomotorische Fähigkeiten einen weitaus größeren Anteil der Leistungsvarianz aufklären. Für den Umgang mit Telepräsenzsystemen sind insbesondere zwei sensomotorische Fähigkeiten erfolgsrelevant, nämlich die Kommandierung von Drehbewegungen und die Bewegungsantizipation. Um auch Anwender zu unterstützen, die nicht über diese Fähigkeiten verfügen, sollten Telepräsenzsysteme so gestaltet sein, dass Rotationen leicht auszuführen sind und eine direkte Abbildung zwischen Ein- und Ausgaberaum vorliegt.

2 Motorische Aspekte

Telepräsenzsysteme erfordern die Bewegung eines Eingabegerätes im Raum. Formal kann eine solche Steuerung mit sechs Freiheitsgraden beschrieben werden (Abb. 13): Die Bewegungen entlang der X-, Y- und Z-Achse werden als *translatorische Freiheitsgrade* bezeichnet; die Drehungen um diese Achsen werden durch den Nick-, Gier- und Rollwinkel beschrieben und als *rotatorische Freiheitsgrade* zusammengefasst (Johannsen, 1993).

Für die Gestaltung der Eingabeseite ist es wesentlich zu wissen, unter welchen Bedingungen der Benutzer überhaupt in der Lage ist, sechs Freiheitsgrade gleichzeitig zu steuern oder wann mit jeder Hand nur eine Gruppe von Freiheitsgraden kommandiert werden sollte. Einige Teleoperationssysteme, wie der ‚Shuttle Remote Manipulator‘ (auch bekannt als Canadarm) der Internationalen Raumstation, wurden zum Beispiel zur beidhändigen Kommandierung ausgelegt, wobei mit einer Hand die Rotationen und mit der anderen Hand die Translationen gesteuert werden (Zhai & Senders, 1997a). Neben der Bewegungskoordination interessiert auch die Bewegungseffizienz und damit die Frage, ob bestimmte Freiheitsgrade schlechter kommandiert werden können als andere.

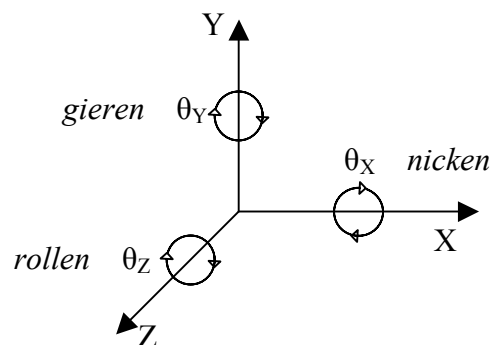


Abb. 13: Bewegungsdimensionen: Räumliche Bewegungen sind durch drei translatorische X, Y und Z sowie drei rotatorische Freiheitsgrade θ_X , θ_Y und θ_Z beschrieben.

2.1 Bewegungskoordination

Bereits in den 40er Jahren wurde vor dem Hintergrund der sich neu entwickelnden Technologien zum ersten mal die Frage gestellt, ob der Mensch überhaupt in der Lage sei, mehrere Freiheitsgrade gleichzeitig zielführend zu steuern.

Eine der ersten Studien stammt von Ellson (1947), wobei eine ‚Trackingaufgabe‘ mit drei translatorischen Freiheitsgraden untersucht wurde. Als Maß für die Bewegungskoordination diente der prozentuale Zeitanteil, zu dem die Probanden eine zielgerichtete

Bewegung vornahmen (TOT, time-on-target). Im Einzelnen wurden die TOT-Werte für alle drei Dimensionen zusammen (STOT, simultaneous time-on-target) und für jede Dimension getrennt (TOT_x, TOT_y, TOT_z) erhoben. Die Messung basiert auf folgender Überlegung: Würde das Produkt der drei Komponenten dem STOT-Wert entsprechen, so könnten die Komponenten als unabhängig betrachtet werden. Wäre der STOT-Wert hingegen größer beziehungsweise kleiner als das Produkt, so würde eine koordinierte beziehungsweise eine unkoordinierte Bewegung vorliegen. Da Ellson (1947) einen geringfügig negativen Zusammenhang beobachtete, folgerte er, dass der ‚Trackingfehler‘ in einer Dimension abnahm, während er in einer anderen zunahm. Weitere Untersuchungen von Gardner (1950) und Senders et al. (1955) führten zu ähnlichen Ergebnissen. Es schien, als würde die Koordinationsgenauigkeit in einer Dimension immer nur auf Kosten einer anderen möglich sein.

Senders (1950) ergänzte seine frühere Studie um zwei weitere Experimente, wobei dieses mal die Steuerung einer ‚Trackingaufgabe‘ in sechs Freiheitsgraden mit einem vergleichbaren Eingabegerät untersucht wurde (Zhai & Senders, 1997a; Zhai & Senders, 1997b). Interessant ist, dass die Ergebnisse ein Spiegelbild der früheren Untersuchung darstellten: Während beim ersten Experiment in drei Viertel aller Bewegungen keine Koordination gelang, erwiesen sich bei den letzten beiden Experimenten drei Viertel aller Bewegungen als koordiniert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die früheren Ergebnisse ein Artefakt der damals verwendeten Eingabetechnologie darstellen. Obwohl es mit heutigen Geräten möglich scheint, mehrere Freiheitsgrade gleichzeitig zu koordinieren, müssen allerdings immer noch ein Viertel der Bewegungen als unkoordiniert bezeichnet werden. Um das Koordinationsproblem zu minimieren, empfehlen Zhai und Senders (1997a/b), nur die Bewegungsdimensionen umzusetzen, die auch benötigt werden. Erfordert die Aufgabe zum Beispiel keine Drehung um den Nickwinkel, so sollte das Gerät die Bewegung auch nicht unterstützen. Dieser Gestaltungsgrundsatz ist vor allem für ‚Trackingaufgaben‘ wesentlich, da hier jede unkoordinierte Bewegung unmittelbar die Leistung verschlechtern würde.

Die Bewegungskoordination von sechs Freiheitsgraden wurde auch von Masliah und Milgram (2000) untersucht, wobei die Probanden instruiert wurden, eine ‚Pick-and-Place‘ Aufgabe mit einem Eingabeball zu bearbeiten. Masliah und Milgram (2000) bestätigten und ergänzten die Ergebnisse von Zhai und Senders (1997a/b): Auch in dieser Untersuchung konnten multiple Bewegungsdimensionen zwar mehrheitlich, aber nicht

immer zielführend koordiniert werden. Zudem stellten sie fest, dass die Benutzer dazu neigten, Untergruppen zu bilden, wobei entweder translatorische oder rotatorische Freiheitsgrade zusammen bewegt wurden. Die Beobachtung lässt sich sowohl motorisch als auch wahrnehmungspsychologisch begründen:

Bereits 1967 vermutete Bernstein, dass der Mensch seine Vielzahl von Muskeln und Gelenken nur durch einen flexiblen Beschränkungsmechanismus zu einer zielgerichteten Bewegung koordinieren kann. Neuere Untersuchungen zur motorischen Bewegungssteuerung bestätigten das Konzept der absichtlich reduzierten Freiheitsgrade und zeigten, dass einige Gelenkwinkel kontrolliert „eingefroren“ und zu Bewegungseinheiten zusammengefasst werden, die in koordinierten Untergruppen zusammenarbeiten (Vereijken et al., 1992; S. 133; Todorv & Jordan, 2002).

Imai und Garner (1965) beobachteten, dass räumliche Stimuli einen multidimensionalen Wahrnehmungsraum definieren, wobei Menschen konstant dazu neigen, translatorische und rotatorische Einheiten wahrzunehmen. Die Untersuchung von Masliah und Milgram (2000) zeigt, dass sich diese Wahrnehmungspräferenz auch in einer Handlungspräferenz widerspiegelt.

Nach Masliah und Milgram (2000) ist eine integrale Kommandierung der Bewegungsdimensionen häufiger, wenn die Eingabebewegungen den natürlichen Handbewegungen entsprechen. Während die Greifmetapher beim Datenhandschuh offensichtlich ist, ist auch beim PHANToM ein Präzisionsgriff realisiert, wie er bei natürlichen Bewegungen zu beobachten ist. Demzufolge dürften beide Geräte eine integrale Steuerung der Freiheitsgrade unterstützen. Bei abstrakten Eingabegeräten, wie Joysticks oder modifizierten Mausgeräten, ist die Art der Steuerung auf den ersten Blick nicht offensichtlich. Buxton (1986; S. 319) schildert ein Fallbeispiel aus der zweidimensionalen Mensch-Computer Interaktion, das sich auf Telepräsenzsysteme übertragen lässt und die Unterschiede deutlich macht:

Fallbeispiel:

Zur Aufgabenbearbeitung stehen ein 3D-Joystick und ein 3D-Spaceball zur Verfügung, die beide im Wesentlichen die gleichen Muskelgruppen beanspruchen. Der Joystick ist federzentriert und kehrt in seine Ausgangsposition zurück, sobald er losgelassen wird; zudem ist eine drehbare Kappe am Knauf angebracht. Der Spaceball kann entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden sowie in horizontaler oder vertikaler Richtung gerollt werden.

① Mit beiden Eingaben soll zunächst ein komplexes CAD-Szenario bearbeitet werden, das nur in einem sehr kleinen Maßstab auf einen Blick überschaubar ist. Will man ein

bestimmtes Detail genauer betrachten, so muss in das Bild geschwenkt und der entsprechende Ausschnitt gezoomt werden. Mit dem Joystick fällt es relativ leicht, den Stift zu bewegen und gleichzeitig die Kappe zum Zoomen zu drehen. Mit dem Spaceball hingegen ist es motorisch wesentlich anspruchsvoller, den Ball zu rollen und durch Drehen zu zoomen.

② Beide Eingabegeräte sollen nun für die Prozesssteuerung einer Ölraffinerie eingesetzt werden. Die Rohre und Ventile sind samt ihrer Zustandsinformation grafisch dargestellt, wobei der Anwender angewiesen ist, die Ventilstellung bei Bedarf anzupassen. Mit dem Joystick würde man zum Ventil navigieren und durch Drehen am Griff nachregulieren. Dabei ist es allerdings schwierig, die Kappe zu drehen, ohne gleichzeitig auch die Position zu verändern. Mit dem Spaceball hingegen können Drehbewegungen unabhängig von der Positionierung durchgeführt werden, so dass die Eingabe hier besser geeignet ist.

Das Beispiel zeigt, dass modifizierte Mausgeräte, wie der Spaceball, aufgrund ihrer mechanischen Konstruktion eine separate Steuerung unterstützen, während der Joystick (z.B. Impulse Engine, Immersion Corp.) eine integrale Steuerung der Bewegungsdimensionen forciert. Klassifiziert man die Eingaben hinsichtlich ihres Abstraktionsgrades und ihrer Kommandierung, so ergibt sich folgende Taxonomie (Abb. 14):

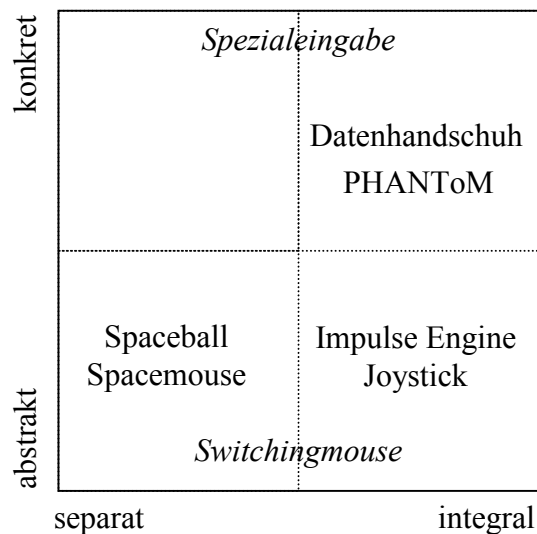


Abb. 14: Klassifikation der Eingabe: Die Einteilung erfolgt nach der Kommandierung (x-Achse) und des Abstraktionsgrades (y-Achse). Spezialeingaben lassen sich aufgrund ihrer applikationsspezifischen Gestaltung nicht eindeutig zuordnen; ebenso unterscheidet sich die ‚Switchingmouse‘ von den anderen Geräten, da sie nur translatorische Bewegungen unterstützt.

Festzuhalten ist, dass mit moderner Telepräsenztechnologie eine Koordination multipler Bewegungsdimensionen zwar gut, aber nicht vollständig gelingt. Wie das Fallbeispiel von Buxton (1986) zeigt, ist eine integrale Steuerung der Bewegungsdimensionen aber auch nicht immer, sondern nur aufgabenabhängig anzustreben. Im Gegensatz zu ‚Tra-

ckingaufgaben' ist in ‚Pick-and-Place' oder ‚Peg-Insertion' Aufgaben weniger der Bewegungspfad entscheidend, als die Tatsache, eine definierte Endposition zu erreichen. Hier kann es zum Beispiel vorteilhaft sein, durch die Wahl des Eingabegerätes eine separate Steuerung zu forcieren: Wird getrennt voneinander positioniert und gedreht, so unterstützt das die natürliche Wahrnehmungspräferenz und es fällt dann zum Beispiel leichter, Kollisionen zu überwachen. Aus dem Grund ist es auch sinnvoll, bei Welt-raummontagen mit dem ‚Canadarm', die Steuerung von sechs Freiheitsgraden auf zwei Hände aufzuteilen, wobei mit einer Hand die Translationen und mit der anderen Hand die Rotationen kommandiert werden (Masliah & Milgram, 2000).

2.2 Bewegungseffizienz

Eine Bewegung wird als effizient bezeichnet, wenn die gewählte Trajektorie möglichst wenig von der kürzesten Verbindung abweicht. Während die Bewegungskoordination ein zeitliches Erfolgskriterium darstellt, das mit der TOT-Methode operationalisiert wird, liegt mit der Bewegungseffizienz ein räumliches Kriterium vor, das über die mittleren quadratischen Bewegungsfehler erfasst wird (siehe Berechnung S. 141ff).

Eine umfangreiche Studie zur effizienten Steuerung von sechs Freiheitsgraden stammt von Zhai et al. (1997). In der Untersuchung war eine ‚Trackingaufgabe' mit einem Eingabeball zu bearbeiten, wobei im Wesentlichen zwei Beobachtungen gemacht wurden: Erstens wurden Bewegungen in die Tiefe des Raumes weniger effizient ausgeführt als Horizontal- oder Vertikalbewegungen. Während bei Bewegungen entlang der vertikalen Achse 17 Prozent weniger Fehler gemacht wurden, war der Fehler entlang der horizontalen Achse sogar um 40 Prozent geringer.

Zweitens fiel es den Probanden viel schwerer, Rotationen effizient zu kommandieren als Translationen. Dabei konnten Drehungen um den Rollwinkel (Z-Achse) wesentlich effizienter ausgeführt werden als entsprechende Drehungen um den Nick- oder den Gierwinkel. Die Beobachtung ist kein Widerspruch, sondern eine Bestätigung der obigen Ergebnisse: Z-Rotationen erfordern im Gegensatz zu Drehungen um die X- und Y-Achse keine Verschiebung entlang der Tiefe.

Auch andere Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass vor allem Bewegungen in den Raum fehlerbehaftet sind. Auffallend ist, dass der Effekt sehr unterschiedlich bewertet wird: Während Ware und Balakrishnan (1994) nur eine Fehlerzunahme von 10

Prozent in die Tiefe beobachteten, sprechen Zhai et al. (1997) von bis zu 40 Prozent und Massimino et al. (1989) von 400 Prozent.

Denkbar ist, dass die Unterschiede auf den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe oder auf die verwendeten Eingabegeräte zurückzuführen sind. Bedenkt man, dass der menschliche Wahrnehmungsapparat gegenüber einer Reihe visueller Tiefenhinweise sensibel ist, so könnte auch die verwendete Displaytechnologie eine plausible Erklärung darstellen. In der Wahrnehmungspsychologie werden fünf visuelle Tiefenindikatoren unterschieden, die in den Untersuchungen unterschiedlich realisiert worden sind und in Tabelle 1 zusammengestellt sind (Morar et al., 2002):

	Tiefenindikatoren	Umsetzung in virtuellen Umgebungen
A	Interposition und Okklusion	Verdeckte Liniendarstellung
B	Perspektive und Texturgradienten	3D-Modell und Texturen
C	Schatten und Licht	Visuelle Renderingeffekte
D	Monokulare Parallaxe	Trackingsysteme
E	Binokulare Parallaxe	Shutter- und Polarisationsbrillen

Tab. 1: Visuelle Tiefenindikatoren und deren Umsetzung in virtuellen Umgebungen: Massimino et al. (1989) [A, B], Zhai et al. (1997) [A, B, E] und Ware et al. (1994) [A, B, D, E] realisierten unterschiedliche Hinweisreize.

Da bei Teleoperationen in der Regel reale Kamerabilder verwendet werden, sind hier die meisten Tiefenindikatoren, mit Ausnahme von [D, E], bereits umgesetzt.

A) Objekte, die sich näher beim Betrachter befinden, überlagern (Interposition) oder verdecken (Okklusion) weiter entfernte und geben so einen Hinweis auf die räumliche Tiefe. Da alle drei Untersuchungen in virtuellen Umgebungen durchgeführt worden sind und in einer Simulation verdeckte Liniendarstellungen implementiert sind, war der Tiefenindikator in allen drei Experimenten umgesetzt.

B) Daneben stellt auch die perspektivische Größenänderung einen visuellen Tiefenindikator dar: Parallele Strukturen scheinen in der Entfernung zu konvergieren und einzelne Elemente der Struktur erscheinen mit zunehmender Entfernung immer kleiner und dichter zusammenliegend. Gibson (1950) hat den Tiefenhinweis als den Texturgradienten einer Oberfläche bezeichnet. Während Texturen in keiner der Untersuchungen vorgesehen waren, ist die Linearperspektive ein wesentlicher Bestandteil aller Simulationen.

C) Zudem geben auch auftretende Helligkeitsveränderungen einen Hinweis auf die Raumposition. Die Darstellung von Licht und Schatten wird in virtuellen Umgebungen,

wegen der damit verbundenen hohen Rechnerkapazität, selten verwendet und wurde auch in diesen drei Untersuchungen nicht umgesetzt.

D) Alle bisher genannten visuellen Tiefenhinweisreize erfüllen ihre Funktion in einer statischen Umwelt. Weitere Tiefenindikatoren sind verfügbar, wenn ein Objekt von verschiedenen Standpunkten aus gesehen wird. Die dabei auftretende relative Verschiebung zweier unterschiedlich weit entfernter Objekte wird auch als Bewegungsparallaxe bezeichnet. Dabei macht es keinen Unterschied, ob sich das Objekt bewegt oder der Betrachter durch Kopfbewegungen seinen Standpunkt verändert (Hubona et al, 1999). Entscheidet man sich allerdings, die Bilder in Abhängigkeit der Kopfbewegung auszugeben, so muss ein ‚Trackingsystem‘ eingesetzt werden. Während Objektbewegungen in keiner der Untersuchungen vorgesehen waren, erfassten Ware und Balakrishnan (1994) die Kopfbewegungen der Anwender und ermöglichten so Bewegungsparallaxe.

E) Neben der Vielzahl monokularer Hinweisreize, spielt auch das Sehen mit zwei Augen für die räumliche Wahrnehmung eine besondere Rolle. Beim binokularen Sehen werden, durch die unterschiedlichen Positionen der Augen, die Gegenstände in jedem Auge etwas anders abgebildet und so Tiefeninformation im Cortex generiert. Binokulare Parallaxe wird in Telepräsenzsystemen durch Shutter- und Polarisationsbrillen realisiert. Stereoskopische Brillen waren sowohl in dem Experiment von Ware und Balakrishnan (1994) als auch in der Untersuchung von Zhai et al. (1997) vorgesehen; nicht aber bei Massimino et al. (1989).

In so genannten Hinweiskonflikt-Untersuchungen konnte Schriever bereits 1925 zeigen, dass es sich bei der binokularen Parallaxe neben der Bewegungsparallaxe und der Okklusion um den wichtigsten Tiefenindikator handelt. Vergleicht man die Untersuchungen vor diesem Hintergrund, so ist die geringere Bewegungseffizienz in der Untersuchung von Massimino et al. (1989) beziehungsweise die entsprechend höhere Bewegungseffizienz bei Zhai et al. (1997) sowie bei Ware und Balakrishnan (1994) nachvollziehbar.

Festzuhalten ist, dass bei Aufgaben, die einen hohen Bewegungsanteil in den Raum erfordern, visuelle Tiefenindikatoren sorgfältig umgesetzt sein sollten: Der Bewegungsfehler lässt sich besonders durch das Tragen von stereoskopischen Brillen, durch die Darstellung bewegter Bilder oder durch die Bildausgabe in Abhängigkeit der Kopfbewegung minimieren. Wenngleich eine konsequente Umsetzung visueller Tiefenhinwei-

se den Bewegungsfehler reduziert, ist es allerdings unwahrscheinlich, eine Fehlerreduktion von mehreren hundert Prozent ($400\% - 10\% = 390\%$) zu erzielen. Da der hier geschilderte Effekt auf einem Vergleich verschiedener Untersuchungen basiert, sind ungewollte Variationen zwischen den experimentellen Bedingungen nicht auszuschließen. Realisiert man die Parallaxeinformation als unabhängige Variable in einem Experiment, so dürfte der Effekt vermutlich deutlich geringer sein.

Auch die von Zhai et al (1997) gemachte Beobachtung, dass Rotationen weniger effizient ausgeführt werden als Translationen, lässt sich durch weitere Literaturstellen belegen: Zhai und Milgram (1998) untersuchten eine ‚Pick-and-Place‘ Aufgabe und zeigten, dass bei Rotationen sogar um bis zu 580 Prozent mehr Fehler gemacht wurden als bei Translationen. Ware und Rose (1999) verglichen Translations- und Rotationsbewegungen hinsichtlich der Bearbeitungszeit und stellten fest, dass ungeübte Probanden ungefähr viermal solange brauchten, um ein dreidimensionales Objekt zu rotieren als zu positionieren. Die Feststellung, dass Drehbewegungen eine höhere kognitive Belastung als Translationen darstellen, ist keine Besonderheit von Telepräsenzsystemen. Wenngleich sich der Effekt in der Mensch-Computer Interaktion deutlicher zeigt, ist er auch bei manuellen Operationen zu beobachten: Bereits 1971 zeigten Shepard und Metzler in einer Reihe von Experimenten zur mentalen Rotation, dass die benötigte Reaktionszeit linear mit dem erforderlichen Drehwinkel zunimmt. Für die ineffizienten Rotationsbewegungen sind folgende Erklärungen denkbar:

Dreht man zum Beispiel an einer Schraube, so muss die Hand, bedingt durch Gelenksbeschränkungen, immer wieder in die Ausgangsposition zurückgesetzt werden. Vergleichbar dazu müssen auch manche Eingabegeräte bei Rotationen nachgestellt werden. Zhai et al. (1996) verglichen einen Datenhandschuh, der aufgrund seiner Analogie zur Hand nachgesetzt werden musste, mit einem ballförmigen Eingabegerät, das der Einschränkung nicht unterlag. Drehbewegungen konnten mit dem Ball wesentlich schneller ausgeführt werden.

Als weitere Ursache diskutieren Ware und Rose (1999) die seitliche Verschiebung von Ein- und Ausgaberaum. Mit der Eingabe werden immer auch körperrelevante Hinweise, wie der Gelenkwinkel der Hand oder die Stellung des Eingabegerätes relativ zur Torso-Mittellinie, aufgenommen. Anders als bei der realen Aufgabenbearbeitung fallen in der Mensch-Computer Interaktion der Ein- und der Ausgaberaum nicht zusammen, so

dass die propriozeptiven Reize mit den gesehenen nicht übereinstimmen. Um diese laterale Verschiebung zu vermeiden, realisierten Ware und Rose (1999) einen Experimentalaufbau, bei dem die virtuellen Objekte durch eine Spiegelkonstruktion auf die Hand des Benutzers projiziert wurden. Eine solche Darstellung wird auch als WYSIWYF-Display (What you see is, what you feel) bezeichnet (Yokokohji et al., 1999). Während Translationen in der gespiegelten und der ungespiegelten Bedingung gleich schnell ausgeführt werden konnten, gelangen Rotationen in der Spiegelbedingung um 35 Prozent schneller.

Darüber hinaus könnte neben der Position auch die Form des Eingabeelementes relevant sein: Shepard und Metzler (1971) legten Probanden zwei perspektivisch gezeichnete Gebilde aus Quadern vor. Die Versuchspersonen sollten entscheiden, ob die beiden gezeigten Objekte durch Drehung im Raum miteinander in Deckung gebracht werden können. Dabei schien es, als würden die Probanden die Objekte tatsächlich in der Vorstellung so lange drehen, bis sie zur Deckung kommen. Es ist deshalb denkbar, dass Spezialeingaben, welche die gleiche physische Form wie das gesehene Objekt aufweisen, die kognitive Belastung reduzieren und helfen, die ideale Rotationsachse zu finden.

Festzuhalten ist, dass Rotationen weniger effizient ausgeführt werden als andere Bewegungen. Bereits die Voruntersuchung mit dem Wiener Testsystem hat gezeigt, dass die Fähigkeit, Drehbewegungen stabil zu kommandieren, eine Schlüsselqualifikation für Telepräsenzsysteme darstellt (S. 35). Bei Aufgaben mit einem hohen Rotationsanteil, sollten deshalb Eingabegeräte verwendet werden, die keinen Gelenkbeschränkungen unterliegen und nicht nachgestellt werden müssen. Außerdem sollte eine seitliche Verschiebung von Ein- und Ausgaberaum vermieden werden. Zu prüfen ist, inwieweit Spezialeingaben eine Unterstützung für Rotationsbewegungen darstellen.

2.3 Empirische Untersuchung

Aus der Literatur zur motorischen Bewegungssteuerung lassen sich sechs Hypothesen als Ausgangspunkt für die nachfolgende experimentelle Untersuchung ableiten:

- H_{M1} Mit heutiger Telepräsenztechnologie ist eine perfekte Bewegungskoordination nicht möglich. Ein Viertel der Bewegungen muss als unkoordiniert bezeichnet werden (Zhai & Senders, 1997a/b).
- H_{M2} Unabhängig von der Bewegungskoordination wird eine integrale oder separate

Steuerung von Translationen und Rotationen vor allem durch das Eingabeelement bestimmt (Masliah & Milgram, 2000).

- H_{M3} Ein Eingabeelement, das eine integrale Steuerung unterstützt, ist nicht per se besser als ein separierendes. Erst die Aufgabe entscheidet, welches Eingabeelement gewählt werden sollte (Buxton, 1986).
- H_{M4} Die Freiheitsgrade sind hinsichtlich ihrer Bewegungseffizienz nicht als homogen zu betrachten: (a) Bewegungen in den Raum und (b) Drehungen können weniger effizient ausgeführt werden (Zhai et al., 1997).
- H_{M5} Bewegungen in den Raum gelingen effizienter, wenn stereoskopisches Sehen unterstützt wird. Der Effekt wird im Vergleich verschiedener Untersuchungen allerdings überbewertet und die hier zu beobachtende Fehlerreduktion wird deutlich geringer sein (Massimino et al., 1989; Ware et al., 1994; Zhai et al., 1997).
- H_{M6} Drehungen gelingen effizienter, wenn eine Spezialeingabe vorliegt, bei der das Eingabeelement und der Arbeitsgegenstand die gleiche physische Form aufweisen (Shepard & Metzler, 1971).

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine ‚Peg-Insertion‘ Aufgabe aufgebaut, wie sie auch im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung relevant ist, um die Verbaubarkeit von Bauteilen zu überprüfen. Die Aufgabe bestand darin, eine Batterie so schnell und so kollisionsfrei wie möglich in eine virtuelle Autokarosserie einzubauen. Die Bearbeitung erfolgte mit drei Eingabeelementen, die sich systematisch unterschieden (Abb. 15):

Die beste Übereinstimmung zur Aufgabe würde vorliegen, wenn das Eingabeelement die Form einer Batterie aufweisen würde. Aus diesem Grund wurde der Kunststoffkasten einer realen Batterie als applikationsspezifische Spezialeingabe (A) umfunktioniert. Bei einer realen Montage würde man das Bauteil anheben, zur Montageposition führen und dann durch entsprechende Drehbewegungen einsetzen. Obwohl zur Aufgabenbearbeitung alle sechs Freiheitsgrade benötigt werden, sind translatorisch-rotatorische Bewegungen selten. Folglich handelt es sich um ein konkretes Eingabeelement, mit dem Translationen und Rotationen getrennt kommandiert werden. Als Gegenstück sollte ein abstraktes Eingabeelement in das Experiment aufgenommen werden, das eine integrale Steuerung unterstützt. Hierfür erschien ein Joystick (C) als geeignet. Bei den beiden Dimensionen, Abstraktionsgrad und Bewegungskoordination, handelt es sich um keine Dichotomie, sondern um ein Kontinuum. Eine mittlere Position wurde anhand einer schwarzen Box operationalisiert, die eine Metapher (B) für die Batterie darstellte.

Bei der Evaluation von Eingabegeräten unterscheiden sich die betrachteten Geräte häufig durch eine Vielzahl technischer Steuerungsparameter. Zur Kontrolle der Störvariab-

len wurden alle Eingabeelemente gewichtskompensiert am DLR-Manipulator (S. 13) angebracht. Die Versuchsperson nahm die Eingabe vor, indem sie vor dem Manipulator stehend das Eingabeelement entsprechend kommandierte. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die beobachteten Unterschiede tatsächlich auf die Eingabeelemente und nicht auf verschiedene Regelungsarchitekturen zurückzuführen sind.

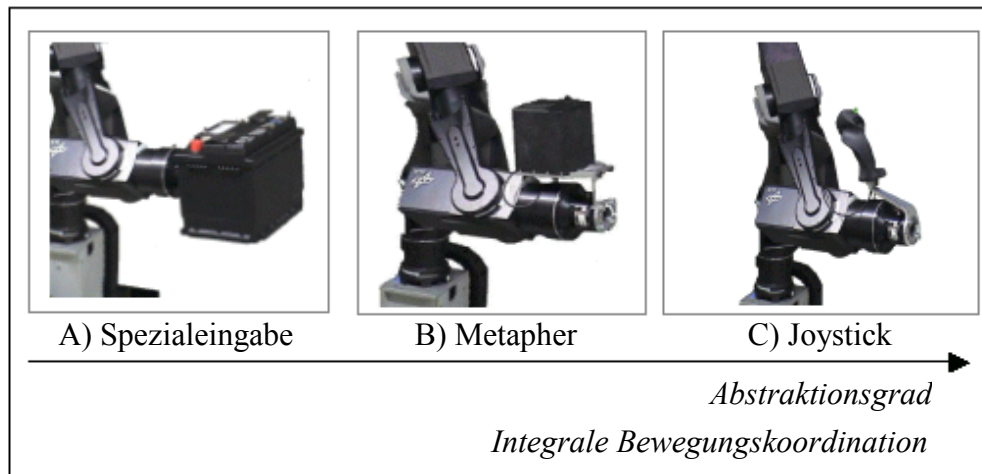


Abb. 15: Motorisches Experiment: Die Eingabeelemente lassen sich hinsichtlich ihres Abstraktionsgrades und ihrer integralen Bewegungskoordination auf einem Kontinuum anordnen.

Um Drehbewegungen möglichst effizient zu gestalten, wurde eine seitliche Verschiebung zwischen Ein- und Ausgaberaum vermieden, indem der Manipulator frontal vor einer Projektionsleinwand positioniert wurde (Ware & Rose, 1999). Zudem sollten Drehbewegungen nicht durch Gelenkbeschränkungen unterbrochen werden, so dass der Manipulator automatisch repositioniert wurde (Zhai, 1995; Zhai et al., 1996).

In allen Durchgängen waren Okklusion, Interposition und perspektivische Größenhinweise als visuelle Tiefenindikatoren verfügbar; monokulare Parallaxe sowie Licht und Schatten waren nicht vorgesehen. Damit waren die gleichen Tiefenhinweise wie in der Untersuchung von Massimino et al. (1989) realisiert. In der Hälfte der Bedingungen wurde stereoskopisches Sehen mit einer Polarisationsbrille unterstützt, wie das in dem Experiment von Zhai et al. (1997) der Fall war.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass in dem Experiment zwei unabhängige Variablen operationalisiert worden sind: Es standen drei verschiedene Eingabeelemente zur Verfügung und die optische Darstellung erfolgte entweder in Mono- oder in Stereoqualität. Der Versuch war als Within-Subject Design gestaltet, so dass jeder der elf Pro-

banden alle Bedingungen durchlief. Da die meisten Versuchspersonen kaum oder keine Erfahrung im Umgang mit Telepräsenzsystemen hatten, war zu Beginn eine ausführliche Übungsphase vorgesehen, in der sich die Teilnehmer mit der neuen Technologie vertraut machen konnten. Als abhängige Variable wurden die Bewegungseingaben, die Bearbeitungszeiten sowie die ausgegebenen Kräfte und Drehmomente erfasst.

2.3.1 Ergebnisse

Die Bewegungskoordination kann entweder, wie oben geschildert, über die TOT-Methode berechnet werden oder aber aus den Bewegungsfehlern abgeleitet werden (Zhai & Senders, 1997a/b): Liegt eine simultane, zielführende Koordination mehrerer Freiheitsgrade vor, so müssen die mittleren quadratischen Bewegungsfehler zu jedem Messzeitpunkt auch miteinander zu- oder abnehmen. Dieser Sachverhalt lässt sich mit einer linearen Korrelationsanalyse erfassen. Betrachtet man den prozentualen Anteil der positiven und negativen Korrelationen über alle Durchgänge, so erhält man ein Maß für die simultane Koordinationsfähigkeit (siehe Berechnung S. 141ff).

Das Histogramm in Abbildung 16 zeigt, dass in dem Experiment in 63 Prozent der Fälle entweder kein oder ein positiver Korrelationszusammenhang der Bewegungsfehler zu beobachten war. Demnach war auch in dieser Untersuchung keine perfekte Bewegungskoordination möglich und in 37 Prozent der Fälle verursachte eine zielführende Koordination einer Bewegungsdimension eine unkoordinierte Bewegung in einer oder mehreren anderen Dimensionen (H_{MI}).

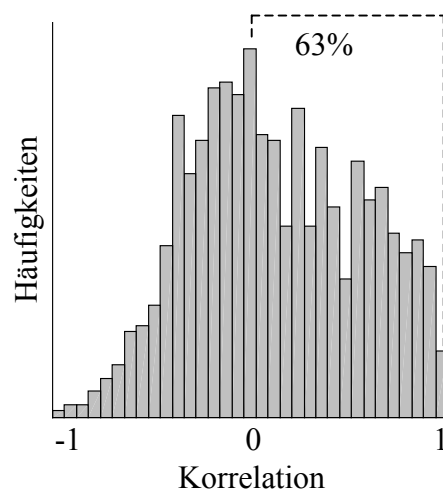


Abb. 16: Bewegungskoordination: Eine simultane Koordination mehrerer Freiheitsgrade spiegelt sich in einer positiven Korrelation der mittleren quadratischen Bewegungsfehler wider; dies war in 63% der Fälle zu beobachten.

Eine differenziertere Aussage ergibt sich, wenn die Bewegungskoordination für die Eingabeelemente getrennt ermittelt wird und zwischen der Koordination von translatorischen, rotatorischen und gemischt translatorisch-rotatorischen Bewegungen unterschieden wird. Tabelle 2 fasst den prozentualen Anteil der positiven Korrelationen und damit der gelungenen Bewegungskoordination zusammen:

%	Spezialeingabe	Metapher	Joystick	<i>Mittelwert</i>
Translationen	100	77	79	85
Rotationen	65	42	58	55
Gemischt	40	54	53	49
<i>Mittelwert</i>	68	58	63	63

Tab. 2: Bewegungskoordination: Die Prozentangaben beziehen sich auf den Anteil ziel führend simultan koordinierter Bewegungen.

Vergleicht man die Koordination von Translations-, Rotations- und Translations-Rotationsbewegungen varianzanalytisch, so besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Bewegungsdimensionen (Zeilen): Wie ein Bonferroni Post-Hoc Test zeigt, konnten translatorische Freiheitsgrade signifikant⁶ besser koordiniert werden als rotatorische oder translatorisch-rotatorische Bewegungsdimensionen. Folglich fiel es den Benutzern, unabhängig vom Eingabegerät, wesentlich leichter, koordiniert zu positionieren als zu drehen, beziehungsweise zu positionieren und gleichzeitig zu drehen.

Die Bewegungskoordination gelang mit der Spezialeingabe zwar am Besten, aber auch mit den anderen beiden Eingaben waren vergleichbar koordinierte Bewegungen zu beobachten. Für die Untersuchung interessiert deshalb weniger der Koordinationsunterschied zwischen den Eingabeelementen als die Tatsache, dass die Anwender abhängig vom Eingabeelement zu verschiedenen Bewegungsstrategien tendierten (Spalten): Wie eine varianzanalytische Auswertung mit anschließendem Bonferroni Post-Hoc Test zeigt, wurden mit der Spezialeingabe translatorische Freiheitsgrade signifikant⁷ öfter simultan koordiniert als mit der Metapher oder mit dem Joystick. Demgegenüber wurden gemischte Translations-Rotationsbewegungen mit der Metapher und dem Joystick signifikant⁸ öfter gleichzeitig koordiniert als mit der Spezialeingabe.

Wie vermutet, unterstützt die Spezialeingabe eine separate Kommandierung der Bewegungsdimensionen, während der Joystick und auch die Metapher eine integrale Steue-

nung forcieren. Trotz gleicher Aufgabe und konstanter Regelungsarchitektur bestimmte folglich vor allem das Eingabeelement die Bewegungsstrategie (H_{M2}).

Die qualitativ unterschiedlichen Eingabestrategien spiegeln sich auch im Montagepfad wider (Abb. 17): Dabei wird offensichtlich, dass die Montage mit der Spezialeingabe zielstrebigere ausgeführt wurde als mit der Metapher oder dem Joystick. Eine integrale Steuerung der Bewegungsdimensionen ist folglich nicht per se besser; für diese Aufgabe erwies sich ein separierendes Eingabeelement als überlegen (H_{M3}).

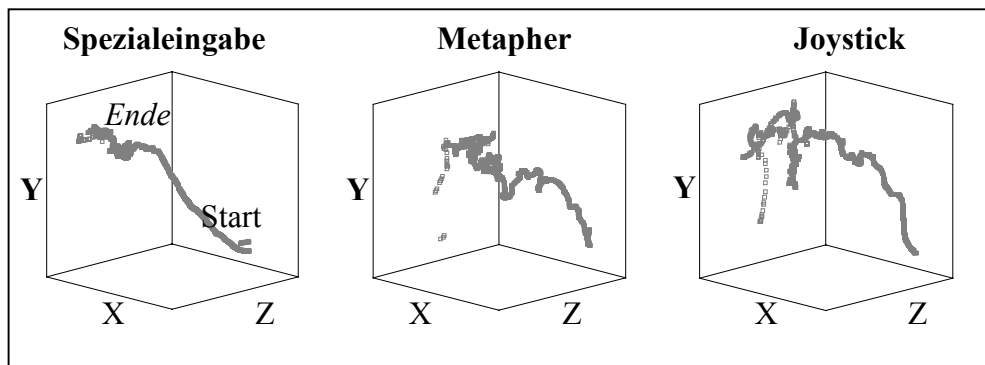


Abb. 17: Montagepfad: Eine separate Kommandierung von Translationen und Rotationen, wie das bei der Spezialeingabe zu beobachten war, erwies sich für diese Aufgabe als überlegen.

Um neben der Bewegungskoordination auch die Effizienz der Aufgabenbearbeitung zu berücksichtigen, wurde der mittlere quadratische Bewegungsfehler für alle Freiheitsgrade ermittelt (siehe Berechnung S. 141ff). Die Ergebnisse fasst Tabelle 3 zusammen:

Translationen		Rotationen	
X_{MQF}	0.0537	R_{xMQF}	1.6681
Y_{MQF}	0.1949	R_{yMQF}	0.1650
Z_{MQF}	0.1911	R_{zMQF}	0.1376
<i>Mittel</i>	<i>0.1466</i>	<i>Mittel</i>	<i>0.6569</i>

Tab. 3: Bewegungseffizienz: Die Zellenwerte geben die mittleren quadratischen Bewegungsfehler (MQF) für die sechs Freiheitsgrade wieder.

Betrachtet man zunächst die Translationen, so konnten Bewegungen in den Raum (Z_{MQF}) zwar weniger effizient ausgeführt werden als horizontale Bewegungen (X_{MQF}). Anders als bei Zhai et al. (1997) war der Bewegungsfehler in die Tiefe aber etwas geringer als der entlang der vertikalen Achse (Y_{MQF}). Der höhere vertikale Bewegungsfeh-

ler dürfte allerdings zum Teil auf die ‚Peg-Insertion‘ Aufgabenstellung zurückzuführen sein, die einen senkrechten Einbau verlangte.

Vergleicht man in einem t-Test den mittleren Translations- und Rotationsfehler, so waren Drehbewegungen signifikant⁹ weniger effizient; im Mittel wurden dabei viermal so viele Fehler wie bei Translationsbewegungen gemacht. Bei einer genaueren, varianzanalytischen Betrachtung zeigt sich aber, dass eigentlich nur Rotationen um den Nickwinkel (R_{xMQF}) fehlerbehaftet waren und dabei zwölf mal so viele Fehler gemacht wurden als zum Beispiel beim Rollen (R_{zMQF}); dieser Unterschied kann als statistisch sehr signifikant¹⁰ bezeichnet werden. Andere Drehbewegungen konnten hingegen gut ausgeführt werden.

Festzuhalten ist, dass die Freiheitsgrade hinsichtlich ihrer Bewegungseffizienz zwar nicht als homogen zu betrachten sind, anders als vermutet aber nur Drehungen um den Nickwinkel mit einem hohen Bewegungsfehler behaftet waren (H_{MA}).

Die ineffiziente Drehung um den Nickwinkel kann entweder auf visuelle Wahrnehmungsrestriktionen oder auf das Eingabeelement zurückzuführen sein. Der Einfluss beider Variablen lässt sich mit einer Conjointanalyse bestimmen (Abb. 18):

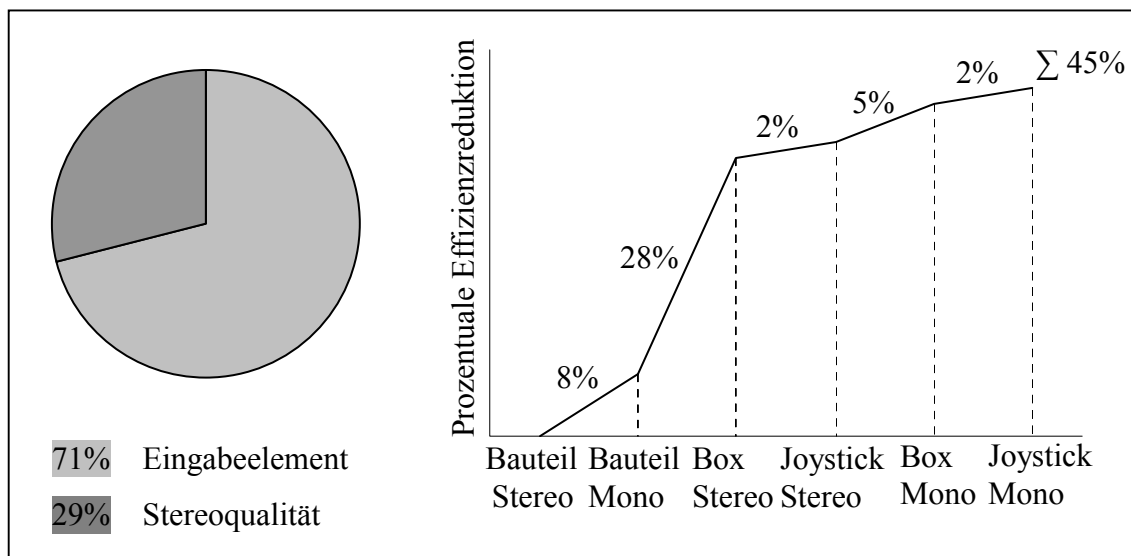


Abb. 18: Bewegungseffizienz: Mit einer Conjointanalyse (Luce & Tukey, 1964; Backhaus et al., 2000) wurde ermittelt, wie wichtig das ‚Eingabeelement‘ und das Vorhandensein von ‚Stereoqualität‘ für effiziente Nickbewegungen waren (links). Mit diesem Verfahren wurde auch berechnet, wie stark sich die unterschiedlichen Systemkombinationen auf die Bewegungseffizienz auswirkten. Abhängig von den verwendeten Systemen konnte der Bewegungsfehler um bis zu 45% reduziert werden (rechts).

Betrachtet man die relative Wichtigkeit der beiden Variablen, so wurde der Rotationsfehler zu 71 Prozent durch die Wahl des Eingabeelementes und nur zu 29 Prozent durch die optische Darstellung beeinflusst (links). Das Vorhandensein stereoskopischer Tiefeninformation verbesserte folglich die Bewegungseffizienz; der Effekt darf aber nicht überbewertet werden, da die Wahl des Eingabeelementes wichtiger war (H_{M5}).

Wie die Conjointanalyse auch zeigt, war eine sprunghafte Fehlerreduktion, von 28 Prozent, zu beobachten, wenn die Drehbewegung mit der Spezialeingabe ausgeführt wurde (rechts). Die Metapher nahm eine Mittelstellung ein, reduzierte den Rotationsfehler gegenüber einer Eingabe mit dem Joystick aber nur geringfügig.

Die Beobachtung wird auch durch eine weitere Variable bestätigt: Betrachtet man die ausgegebenen Drehmomente als Maß für die verursachten Kollisionen bei Rotationen, so wurden mit der Spezialeingabe signifikant¹¹ weniger Kollisionen verursacht als mit der Metapher oder mit dem Joystick. Interessant ist, dass sich der Effekt nur bei Rotationen und nicht bei Translationen zeigt: In einer varianzanalytischen Auswertung konnte kein signifikanter¹² Unterschied zwischen den drei Eingabeelementen hinsichtlich der Ausgabekräfte aufgezeigt werden. Folglich stellt die Spezialeingabe nur bei Drehbewegungen und nicht bei Positionierungen eine Unterstützung dar (H_{M6}).

2.3.2 Diskussion

Wie bereits auch in anderen Untersuchungen festgestellt wurde, gelingt eine Bewegungskoordination mit moderner Telepräsenztechnologie zwar mehrheitlich, aber nicht immer (Masliah & Milgram, 2000). In diesem Experiment wurde der translatorischen Bewegungskoordination Priorität eingeräumt. Bedenkt man, dass Rotations- im Gegensatz zu Translationsfehlern beschränkt sind und maximal 360 Grad betragen können, ist diese Strategie sinnvoll.

Insgesamt mussten in der Untersuchung über ein Drittel der Bewegungen als unkoordiniert bezeichnet werden; Zhai und Senders (1997a/b) klassifizierten lediglich ein Viertel der Bewegungen als nicht koordiniert. Da die von ihnen gewählte Aufgabe allerdings motorisch leichter war, dürfte es sich dabei eher um eine optimistische, untere Grenze handeln (H_{M1}).

Auch wenn mit allen Eingabeelementen eine nahezu vergleichbare Bewegungskoordination gelang, waren trotz gleicher Aufgabe und konstanter Regelungsarchitektur ver-

schiedene Eingabestrategien zu beobachten: Während der Joystick gedreht und verschoben wurde, wurde die Spezialeingabe entweder gedreht oder verschoben. Demnach übt die Wahl des Eingabeelementes einen entscheidenden Einfluss darauf aus, ob Translationen und Rotationen gemeinsam oder getrennt gesteuert werden (H_{M2}).

Obwohl eine integrale Bewegungskoordination der natürlichen Handbewegung entspricht, ist die Eingabestrategie nicht für alle Telepräsenzaufgaben erstrebenswert: Die Joystickbewegungen waren zwar zielführend (Tab. 2; hohe positive Korrelation), aber nicht effizient (Abb. 18; hoher mittlerer quadratischer Fehler). Folglich konnten die Probanden zwar mit dem Joystick umgehen, die damit verbundene Eingabestrategie passte aber nicht zur Aufgabe. Hätte die Aufgabe schnelle Translations-Rotations-Korrekturen erfordert, wie das bei dynamischen ‚Trackingaufgaben‘ der Fall ist, so wäre vermutlich mit dem Joystick der geringste Bewegungsfehler zu beobachten gewesen (H_{M3}).

Unabhängig vom Eingabegerät konnten nicht alle Bewegungsdimensionen gleich effizient kommandiert werden, wobei in dieser Untersuchung vor allem Rotationen um den Nickwinkel fehlerbehaftet waren. Die Schlussfolgerung, dass Drehbewegungen generell weniger effizient ausgeführt werden als Translationen, hat sich nicht bestätigt (Zhai et al., 1997). Eine plausible Erklärung für das abweichende Ergebnis bietet der Versuchsaufbau: Es war kein manuelles Nachsetzen bei Gelenkbeschränkungen erforderlich (Zhai et al., 1996); ferner lag keine seitliche Verschiebung von Ein- und Ausgaberaum vor (Ware & Rose, 1999). Folglich können die getroffenen Maßnahmen zur Unterstützung von Rotationsbewegungen als effektiv bezeichnet werden (H_{M4}).

Die Beseitigung visueller Wahrnehmungsrestriktionen erscheint zwar hilfreich; die hohe Bedeutung der optischen Darstellungsqualität, wie sie aus dem Literaturvergleich abzuleiten ist, konnte aber nicht repliziert werden: Lediglich 29 Prozent des Bewegungsfehlers konnten durch das Tragen einer Stereobrille kompensiert werden. Ebenso kann auch die Feststellung, dass besonders Bewegungen in den Raum fehlerbehaftet sind, nicht uneingeschränkt unterstützt werden (H_{M5}).

Der hier beobachtete Bewegungsfehler ließ sich vor allem durch ein geeignetes Eingabeelement reduzieren. Insbesondere Rotationen um den Nickwinkel konnten effizienter und kollisionsfreier ausgeführt werden, wenn die Form des Eingabeelementes mit dem Arbeitsgegenstand übereinstimmte. Der Bewegungsfehler war demzufolge mit der Spe-

zialeingabe, aber auch mit der Metapher, geringer als beim Joystick. Ähnlich, wie das WYSIWYF-Display in der Untersuchung von Ware und Rose (1999) nur bei Drehbewegungen eine Verbesserung bewirkte, beschränkte sich der Effekt auch hier auf den Rotationsraum. Folglich empfiehlt es sich vor allem für Aufgaben mit einem hohen Rotationsanteil, bei denen Kollisionen zudem teure Materialschäden verursachen könnten, Spezialeingaben zu verwenden (H_{M6}).

2.4 Zusammenfassung

Um eine koordinierte und effiziente Steuerung von sechs Freiheitsgraden in Telepräsenz Anwendungen zu unterstützen, sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Auch mit moderner Telepräsenztechnologie muss ungefähr ein Drittel aller Bewegungen als unkoordiniert bezeichnet werden. Um das Koordinationsproblem zu minimieren, sollte das Eingabegerät nur die Bewegungsdimensionen unterstützen, die auch für die Aufgabe benötigt werden.
- Menschen neigen zu einer getrennten Wahrnehmung von Translationen und Rotationen. Für ‚Pick-and-Place‘ und ‚Peg-Insertion‘ Aufgaben, in denen vor allem eine definierte Endposition zu erreichen ist, kann es deshalb hilfreich sein, Eingabegeräte zu verwenden, die eine getrennte Steuerung von Positionier- und Drehbewegungen unterstützen (z.B. Spacemouse, Spaceball). Können auftretende Kollisionen hohe Kosten verursachen, kann es sogar sinnvoll sein, eine beidhändige Steuerung anzustreben, bei der mit einer Hand die Rotationen und mit der anderen Hand die Translationen kommandiert werden.
- Bei ‚Trackingaufgaben‘ ist der Aufgabenerfolg durch die Einhaltung eines bestimmten Bewegungspfades definiert; jede unkoordinierte Bewegung würde unmittelbar die Leistung verschlechtern. Hier ist es entscheidend, Eingabegeräte einzusetzen, die eine gemeinsame Kommandierung der geforderten Bewegungsdimensionen forcieren (z.B. Joystick, PHANToM, Datenhandschuh).
- Die Bewegungseffizienz kann durch das Vorhandensein visueller Tiefenhinweise verbessert werden. Werden die Bilder in Abhängigkeit der Kopfbewegungen ausgegeben oder trägt der Anwender eine Stereobrille, so wird die Tiefenwahrnehmung

durch die vorhandene Parallaxeinformation verbessert. Der Effekt darf allerdings nicht überbewertet werden und eine adäquate Wahl des Eingabeelementes wird wesentlich wichtiger sein.

- Rotationen, insbesondere Drehungen um den Nickwinkel, können weniger effizient ausgeführt werden als andere Bewegungen. Bei Aufgaben mit einem hohen Rotationsanteil sollten deshalb Eingabegeräte verwendet werden, die keinen Gelenkbeschränkungen unterliegen und nicht nachgestellt werden müssen (z.B. Spacemouse, Spaceball). Außerdem sollte eine seitliche Verschiebung von Ein- und Ausgaberaum vermieden werden. Hier kann es bereits hilfreich sein, die Eingabe frontal vor der Ausgabe zu positionieren; im Idealfall wird aber ein WYSIWYF-Display eingesetzt. Ferner empfiehlt es sich, Spezialeingaben anzufertigen, welche die gleiche physische Form wie der gesehene Arbeitsgegenstand aufweisen.

3 Sensomotorische Aspekte

Koordinierte und effiziente Bewegungen sind nur möglich, wenn ein erfolgreiches Zusammenspiel aus sensorischer und motorischer Information vorliegt: Zum einen werden motorische Eingaben durch visuelles Feedback korrigiert, zum anderen gilt es, beide Hände zueinander zu koordinieren. Zwei weitere wesentliche Punkte sind damit die *Auge-Hand-Koordination* beziehungsweise die *Hand-Hand-Koordination* des Benutzers.

In Telepräsenzsystemen unterscheidet sich die Auge-Hand-Koordination entscheidend von der realen Aufgabenbearbeitung, da alle Bewegungen erst durch ein Eingabegerät übersetzt werden müssen. Im Wesentlichen werden dabei zwei Transferfunktionen unterschieden (Abb. 19):

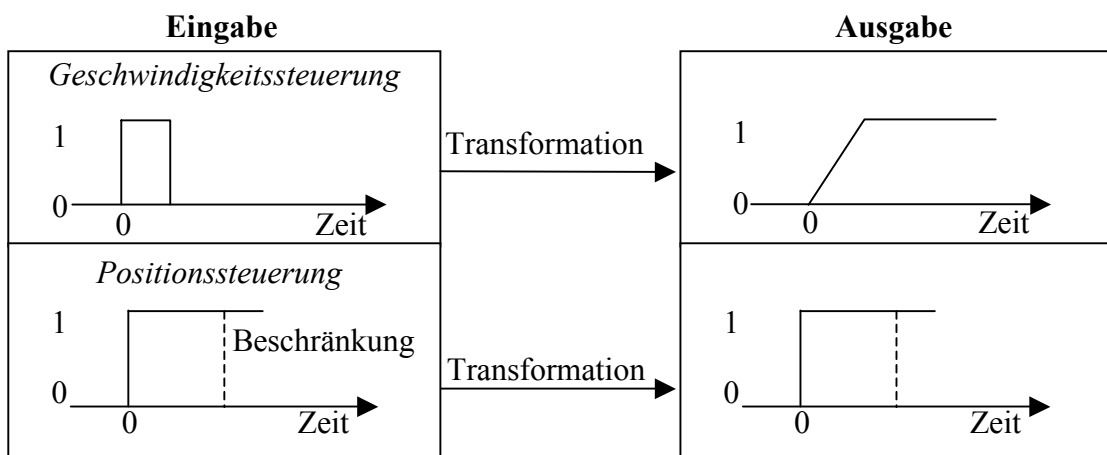


Abb. 19: Transferfunktionen: Mit der Eingabe kann entweder die Bewegungsgeschwindigkeit (oben) oder die Objektposition (unten) kommandiert werden.

Im ersten Fall wird die Eingabe des Benutzers in die Bewegungsgeschwindigkeit eines Telemanipulators beziehungsweise eines virtuellen Objektes übersetzt und man spricht von *Geschwindigkeitssteuerung*. Im zweiten Fall ist mit der Eingabe die Objektposition vorgegeben und es handelt sich um eine *Positionssteuerung*. Da die Eingabe direkt proportional zu den Fingerbewegungen ist, unterliegt die Positionssteuerung, anders als die Geschwindigkeitssteuerung, kinematischen Beschränkungen (Bubb & Schmidtke, 1981). Ähnlich wie ein ausgestreckter Arm nicht weiter gestreckt werden kann, haben zum Beispiel auch die Gelenke eines PHANToMs nur eine begrenzte Bewegungsreichweite. Bei der Computermaus ist diese Arbeitsplatzbeschränkung einfach durch Hochheben und Neuplatzieren zu umgehen. Bei räumlichen Eingabegeräten, wie dem PHANToM, muss ein so genannter ‚Clutching‘-Mechanismus vorgesehen sein. Dabei

handelt es sich um einen Softwaremodus, bei dem die virtuelle Umgebung beziehungsweise der ausführende Telemanipulator eingefroren wird, um das Gerät zu repositionieren (Zhai, 1998).

Welche der beiden Abbildungen vorliegt, wird maßgeblich durch das Eingabegerät bestimmt: Menschliche Gliedmaßen können entweder durch Kraft oder durch Bewegung Signale senden und empfangen, so dass entsprechend zwischen *isometrischen Kraftgeräten* und *isotonischen Verschiebungsgeräten* unterschieden wird. Während isotonische Geräte freibeweglich sind, sind isometrische Geräte unbeweglich und erfassen Richtung und Betrag der Eingabekraft über druckempfindliche Sensoren. Geräte, deren Steuerungswiderstand veränderlich ist und zwischen dem isotonischer und isometrischer Geräte liegt, werden als *elastisch* bezeichnet. Elastische Geräte verfügen über einen selbstzentrierenden Mechanismus und werden proportional zur aufgewendeten Kraft bewegt. Isotonische Geräte sind kompatibel mit der Positionssteuerung; isometrische und elastische Geräte werden geschwindigkeitsgesteuert betrieben (Casiez et al., 2003). Da isometrische Geräte unbeweglich sind, können sie keine Rückmeldung über auftretende Kräfte geben.

Eine vollständige Klassifikation der Eingabegeräte (Tab. 4) muss neben dem Abstraktionsgrad und der Bewegungskoordination auch den Steuerungswiderstand und damit die Transferfunktion der Geräte berücksichtigen (Buxton, 1986; S. 319):

Steuerungswiderstand		
isometrisch*	elastisch*	isotonisch**
<ul style="list-style-type: none"> • Laptopjoystick • Spaceball 	<ul style="list-style-type: none"> • Spacemouse 	<ul style="list-style-type: none"> • Switchingmouse • Impulse Engine • PHANToM • Datenhandschuh

Tab. 4: Klassifikation der Eingabe: Die Einteilung erfolgt nach dem Steuerungswiderstand, wobei zwischen geschwindigkeitsgesteuerten* und positionsgesteuerten** Geräten zu differenzieren ist.

3.1 Auge-Hand-Koordination

Während es sich aus technischer Perspektive bei der Positions- und der Geschwindigkeitssteuerung um zwei unterschiedliche mathematische Abbildungen handelt, interes-

siert aus psychologischer Sicht, mit welcher dieser beiden Transferfunktion die Auge-Hand-Koordination besser gelingt.

Kim et al. (1987) verglichen die Vor- und Nachteile beider Steuerungsarten anhand einer ‚Pick-and-Place‘ und einer ‚Trackingaufgabe‘. Beide Aufgaben konnten mit dem positionsgesteuerten Mechanismus schneller bearbeitet werden.

Eine differenziertere Untersuchung stammt von Zhai und Milgram (1998). Je nachdem, ob die mittlere Bearbeitungszeit oder die Bewegungseffizienz als Kriterium zugrunde gelegt wurde, dominierte eine der beiden Abbildungsfunktionen: Wählte man die Zeit als Leistungsindikator, so erwies sich die Positionssteuerung als überlegen. Legte man die Bewegungseffizienz als Maßstab zugrunde, so war die Geschwindigkeitssteuerung überlegen. Besonders gegen Ende des Experimentes gelang den Teilnehmern in der geschwindigkeitsgesteuerten Bedingung ein effizienterer Arbeitsstil.

Die Untersuchung von Bérard (1999) unterscheidet sich von den beiden obigen, da als Eingabegerät ein positions- beziehungsweise ein geschwindigkeitsgesteuerter ‚Tracker‘ verwendet wurde. Die Anwender kommandierten durch ihre Kopfbewegung entweder die Position oder die Geschwindigkeit eines Objektes. Insgesamt erwies sich die Positionssteuerung immer dann als vorteilhaft, wenn der Anwender das Ziel kannte, während die Geschwindigkeitssteuerung die explorative Navigation unterstützte.

Auch Masliah und Milgram (2000) verglichen die beiden Transferfunktionen. Sie zeigten anhand einer ‚Pick-and-Place‘ Aufgabe, dass es mit positionsgesteuerten Eingaben leichter fiel, sechs Freiheitsgrade gleichzeitig zu koordinieren.

Man kann festhalten, dass sich die Untersuchungen ergänzen: Die Positionssteuerung erlaubt eine schnelle, zielführende Auge-Hand-Koordination und erweist sich vor allem für ungeübte Anwender als vorteilhaft (Kim et al., 1987; Masliah & Milgram, 2000). Die Geschwindigkeitssteuerung hingegen unterstützt geübte Benutzer, genauere und effizientere Bewegungen auszuführen und zu explorieren (Zhai & Milgram, 1998; Bérard, 1999).

Diese empirischen Beobachtungen lassen sich auch theoretisch begründen: Der Positionssteuerung liegt eine mathematisch weniger komplexe Funktion zugrunde, die eine geringere mentale Transformation verlangt und der natürlichen Auge-Hand-Koordination eher entspricht als die Geschwindigkeitssteuerung. Der Benutzer kann

dadurch leichter ein konzeptuelles Modell aufbauen und eine Beziehung zwischen den Eingabehandlungen und der Ausgabe herstellen. Damit wird ein allgemeines Designprinzip genutzt, das auch als „Mapping“ bezeichnet wird (Norman, 2002; S.35).

Bei der Geschwindigkeitssteuerung müssen mehrere Handlungen vorgenommen werden, um das gleiche Ziel zu erreichen: Zunächst muss eine Beschleunigung erfolgen, um dann eine gewisse Geschwindigkeit beizubehalten und schließlich kontrolliert abzubremesen. Der Benutzer reguliert mit Hilfe des visuellen Feedbacks sowohl die Ausschlagshöhe als auch die zeitliche Dauer, was die motorische und die kognitive Belastung erhöht.

Mit Theorien zum motorischen Lernen kann erklärt werden, warum die Geschwindigkeitssteuerung nach mehreren Übungsdurchgängen trotzdem problemlos kommandiert werden kann. Aufbauend auf ‚Trackingstudien‘ haben Krendel und McRuer (1960) eine dreistufige Theorie aufgestellt, die den motorischen Lernprozess als eine aufeinander folgende Organisation der Wahrnehmung beschreibt (SOP-theory, theory of successive organization of perception): In einer ersten Lernphase werden Trackingfehler hauptsächlich durch visuelles Feedback minimiert, mit zunehmender Erfahrung gewinnt die propriozeptive Rückmeldung an Wichtigkeit und schließlich werden die Trackingmuster überwiegend als motorische Programme aus dem Gedächtnis abgerufen.

Folglich benötigen weniger geübte Anwender das propriozeptive Feedback der positionsgesteuerten, isotonischen Geräte, während Experten auf diese Rückmeldung verzichten. Da sie ihr Verhalten über motorische Strategien steuern, können sie auch mit unbeweglichen, geschwindigkeitsgesteuerten Geräten umgehen.

In dem Zusammenhang muss allerdings auf eine Einschränkung hingewiesen werden: Anwender, die unter hohem Stress stehen, neigen dazu, in eine frühere Lernphase zurückzufallen (z.B. Pijpers et al., 2001). Wenn zum Beispiel ein erfahrener Telechirurg in einer Routineoperation mit einem geschwindigkeitsgesteuerten Gerät präziser arbeitet, so muss das noch nicht für einen Notfall gelten. Der geschwindigkeitsgesteuerte Mechanismus ist deshalb nur für einige Anwendungsbereiche zu empfehlen.

Es bleibt schließlich zu klären, warum gerade die komplexe Geschwindigkeitssteuerung mit zunehmender Erfahrung zu besonders präzisen Ergebnissen führt. Diese Koordinationszunahme ist in der integralen Transformation begründet. Im Gegensatz zur Positionsteuerung werden nicht alle Bewegungen des Benutzers übertragen; der geschwindigkeitsgesteuerte Mechanismus wirkt wie ein Filter, der einen hohen Anteil des

hochfrequenten, unfreiwilligen Rauschens eliminiert und so stetigere Objektbewegungen ermöglicht.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass es situationsabhängig ist, ob die Kommandierung positions- oder geschwindigkeitsgesteuert erfolgen sollte: Erfordert die Aufgabe einen großen Arbeitsraum, wie das meistens bei Explorationen der Fall ist, so sind isometrische oder elastische Geräte (z.B. Spacemouse, Spaceball) vorzuziehen, da sie, im Gegensatz zu isotonischen Geräten, nicht nachgesetzt werden müssen. Kleineräumige Manipulationen hingegen können intuitiver mit positionsgesteuerten, isotonischen Geräten (z.B. Computermaus, Impulse Engine, PHANToM, Datenhandschuh) ausgeführt werden. Lediglich erfahrene Anwender, die sich in keiner Stresssituation befinden, profitieren hier von einem geschwindigkeitsgesteuerten Modus.

3.2 Hand-Hand-Koordination

Betrachtet man die Einsatzbereiche von Telepräsenzsystemen, so handelt es sich meistens um Aufgaben, die unter realen Bedingungen beidhändig ausgeführt werden. Aus technischer Sicht stellt die beidhändige Interaktion ein Paar von Eingangsströmen dar und es besteht zunächst kein Grund dafür, die Eingabe in der einen Hand anders als in der anderen zu gestalten. Gleichzeitig sind die motorischen Unterschiede beider Hände offensichtlich:

Flowers (1975) untersuchte die Leistungsfähigkeit der dominanten und der nicht-dominanten Hand in so genannten ‚Tapping‘-Experimenten. Dabei wurden die Probanden aufgefordert, zunächst mit der einen und dann mit der anderen Hand so schnell wie möglich rhythmisch auf ein Ziel zu tippen. Bei diesem ‚Rhythmic-Tapping‘ werden ballistische Bewegungen gefordert, die weniger als 400 Millisekunden dauern und zu schnell sind, als dass eine sensorische Rückmeldung genutzt werden könnte. Anschließend wurde die Aufgabe variiert und die Probanden sollten abwechselnd zwischen zwei Zielen hin und her tippen, wobei die Größe des Ziels und damit die Schwierigkeit der Aufgabe verändert wurde. Dieses ‚Reciprocal-Tapping‘ erfordert gesteuerte Bewegungen, die von visueller oder taktiler Rückmeldung profitieren. Während bei der ersten Aufgabe kein Leistungsunterschied zwischen beiden Händen beobachtet wurde, konnten die schwierigeren Durchgänge der zweiten Aufgabe mit der dominanten Hand bes-

ser ausgeführt werden. Folglich nutzen beide Hände sensorisches Feedback verschieden gut und das zweite Eingabegerät sollte für einfachere Aufgaben vorgesehen sein.

Im Gegensatz zu der traditionellen Annahme, dass eine Hand der anderen überlegen ist, zeigen Todor und Doane (1978), dass sich beide Hände ergänzen und es auch Aufgaben gibt, in denen die nicht-dominante Hand bessere Leistungen erzielt. Sie untersuchten Bewegungen, in denen sowohl die Entfernung als auch die Größe des Ziels variiert wurde. Für weit entfernte und große Ziele, nahmen die Bewegungszeiten mit der dominanten Hand zu, während sie gleichzeitig mit der nicht-dominanten Hand abnahmen. Folglich erweist sich die nicht-dominante Hand für lange Distanzen und große Objekte als überlegen.

Kabbash et al. (1993) bestätigen die Ergebnisse an einer Aufgabenstellung aus der Grafikbearbeitung, die einmal mit der dominanten und einmal mit der nicht-dominanten Hand bearbeitet wurde. Während sich für große Ziele und weite Entfernungen kein Leistungsunterschied zwischen beiden Händen zeigte, war die dominante Hand nur bei kleineren Zielen und kürzeren Entfernungen überlegen.

Eine ähnliche Schlussfolgerung lässt auch eine Untersuchung von Guiard (1987) zu. Hier wurden Rechtshänder aufgefordert, mit jeder Hand einen Eingabeknopf zu steuern und ihre Bewegungen dabei so zufällig und unvorhersehbar wie möglich zu gestalten. Trotz der Instruktion waren systematische Unterschiede zwischen beiden Händen zu beobachten, wobei die rechte Hand schneller bewegt wurde und kleinere Strecken zurücklegte als die linke. Folglich weisen beide Hände eine unterschiedliche Spezialisierung auf: Während die nicht-dominante Hand auf makrometrische Bewegungen ausgerichtet ist, ist die dominante Hand für mikrometrische Bewegungen besser geeignet. Wendet man dieses Skalierungsprinzip auf die Schnittstellengestaltung an, so sollte das Eingabegerät der nicht-dominanten Hand einen größeren Arbeitsraum abdecken. Demzufolge dürften isotonische Geräte nur dann zur Eingabe mit der nicht-dominanten Hand geeignet sein, wenn sie aufgrund ihrer Konstruktion weiträumige Bewegungen unterstützen und nicht zu häufig nachgesetzt werden müssen. Ebenso erscheinen besonders isometrische oder elastische Geräte für die nicht-dominante Hand geeignet, da sich großräumige Bewegungen ohne Repositionierung durchführen lassen.

Guiard (1987) hat einen weiteren Bewegungsgrundsatz für das beidhändige Zusammenspiel aufgestellt, den er als Referenzprinzip bezeichnet. Demnach stellt die nicht-dominante Hand eine räumliche Stabilisation für die dominante Hand dar. So reduziert

sich zum Beispiel die spontane Schreibgeschwindigkeit Erwachsener um zwanzig Prozent, wenn die nicht-dominante Hand das Papier nicht berühren darf (Athenes, 1984).

Hinckley et al. (1998) bestätigen und ergänzen das Prinzip, indem sie eine virtuelle Manipulationsaufgabe mit einem Gedächtnistest kombinierten. Die Teilnehmer wurden zu einem unvorhersehbaren Zeitpunkt instruiert, die Augen zu schließen und blind eine bestimmte Position einzunehmen. Da unter der beidhändigen Bedingung präzisere Resultate erzielt wurden, liegt die Vermutung nahe, dass bei einer einhändigen Eingabe mehr visuelles Feedback benötigt wird, um ein vergleichbares Situationsmodell aufzubauen. Folglich wird mit dem zweiten Eingabegerät nicht nur die motorische Position beider Hände zueinander beschrieben, sondern auch ein kognitiver Referenzrahmen aufgespannt.

Auch Leganchuk et al. (1998) finden experimentelle Belege für die kognitive Entlastung durch ein zweites Eingabegerät. Sie beobachteten bei einer beidhändigen Grafikbearbeitung einen signifikanten Zeitvorteil gegenüber einer einhändigen Technik. Da der Effekt zu groß war, um alleine durch die Zeit-Bewegungs-Effizienz einer zweiten Hand erklärt zu werden, wurde in einem Folgeexperiment die kognitive Belastung variiert. Es zeigte sich, dass der Vorteil der beidhändigen Eingabe umso größer war, je kognitiv anspruchsvoller die bearbeiteten Grafiken waren.

Selbst bei Aufgaben, in denen mit der nicht-dominanten Hand keine Manipulationen vorgenommen werden, sollte deshalb ein zweites Eingabegerät vorgesehen sein. Einige Zeichenprogramme integrieren zum Beispiel eine fiktive Hand: Wird eine Linie gedreht, so hält die virtuelle Hand das andere Linienende und bietet eine räumliche Stabilisation für die Arbeitshand (Raisamo, 1999).

An der Stelle muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass in einer Reihe anderer Studien die Teilnehmer überhaupt nicht oder erst nach einer Übungsphase von der beidhändigen Eingabe profitieren:

Balakrishnan und Kurtenbach (1999) experimentierten mit einer ‚Pick-and-Place‘ Aufgabe und beobachteten, dass die beidhändige Technik nur gegen Ende des Experimentes überlegen war, als die Versuchspersonen die Aufgabe bereits mehrmals ausgeführt hatten.

In einer anderen Studie berichten Balakrishnan und Hinckley (2000), dass simultane beidhändige Bewegungen abnahmen, sobald die Aufgabe motorisch anspruchsvoller

wurde. Die Versuchspersonen gingen dann zu einem sequentiellen Eingabestil über, indem sie zuerst das eine und dann das andere Eingabegerät bewegten.

Folglich lässt sich die Referenzregel der natürlichen bimanuellen Koordination nicht uneingeschränkt auf die Interaktion mit Telepräsenzsystemen übertragen: Ein zweites Eingabegerät kann auch eine zusätzliche sensomotorische Belastung darstellen. Nicht ohne Grund warnen Kabbash et al. (1994; S. 423) davor, mit einer zweiten Eingabe eine asymmetrische „tapping the head and rubbing stomach“ Situation zu schaffen. Um zu verhindern, dass sich die Anwender mehr auf die Geräte als auf die Aufgabe konzentrieren, muss eine intuitive Interaktionssyntax realisiert werden. Da die offensichtlichste Randbedingung der bimanuellen Koordination die Tendenz zu spiegelsymmetrischen Bewegungen ist, scheint es sinnvoll, gleich gestaltete Eingabegeräte für beide Hände zur Verfügung zu stellen (Heuer, 1997).

3.3 Empirische Untersuchung

Die meisten Arbeiten zur bimanuellen Schnittstellengestaltung nehmen die reale Handhabung von Werkzeugen zum Vorbild und suchen nach natürlichen Gesten, die in Form von applikationsspezifischen Zwei-Hand-Metaphern aufwändig nachgebaut werden (z.B. Bier et al., 1994; Kurtenbach et al., 1997; Fitzmaurice & Buxton, 1997; Hinckley et al., 1998). Ein anderer Ansatz, nämlich sensomotorische Grundlagenuntersuchungen auf bereits vorliegende Standardeingaben, wie das PHANToM oder Mausgeräte, anzuwenden, ist weitaus seltener und soll anhand folgender Hypothesen experimentell untersucht werden:

- H_{SM1} Das Eingabegerät der nicht-dominanten Hand muss anders skaliert sein als das der dominanten Hand und weiträumige Bewegungen unterstützen. Demzufolge eignen sich besonders (a) isotonische Geräte, die aufgrund ihrer mechanischen Konstruktion einen großen Arbeitsraum abdecken, sowie (b) isometrische oder elastische Geräte zur Eingabe mit der nicht-dominanten Hand (Todor & Doane, 1978; Guiard, 1987; Kabbash et al., 1993).
- H_{SM2} Ein zweites Eingabegerät kann eine zusätzliche motorische Belastung darstellen, so dass nur Anwender mit Erfahrung oder hohen sensomotorischen Fähigkeiten von einer bimanuellen Standardschnittstelle profitieren (Kabbash et al., 1994; Balakrishnan & Kurtenbach, 1999; Balakrishnan & Hinckley, 2000).
- H_{SM3} Um den manuellen und kognitiven Vorteil einer zweiten Eingabe nutzen zu können, sollten gleiche Geräte für beide Hände gewählt werden (Heuer, 1997).

Verschiedene Geräte lassen sich nur dann sinnvoll in einen Versuchsaufbau integrieren, wenn mit der Experimentalaufgabe nicht ungewollt ein Eingabegerät bevorzugt wird. Das Szenario sollte deshalb verschiedene Handlungen erfordern und sowohl ‚Point-and-Click‘, ‚Pick-and-Place‘ als auch ‚Peg-Insertion‘ Elemente enthalten. Den Anforderungen entsprechend wurde eine Werkzeugmaschine modelliert, wie sie auch in der virtuellen Montageplanung eingesetzt werden könnte (Abb. 20).

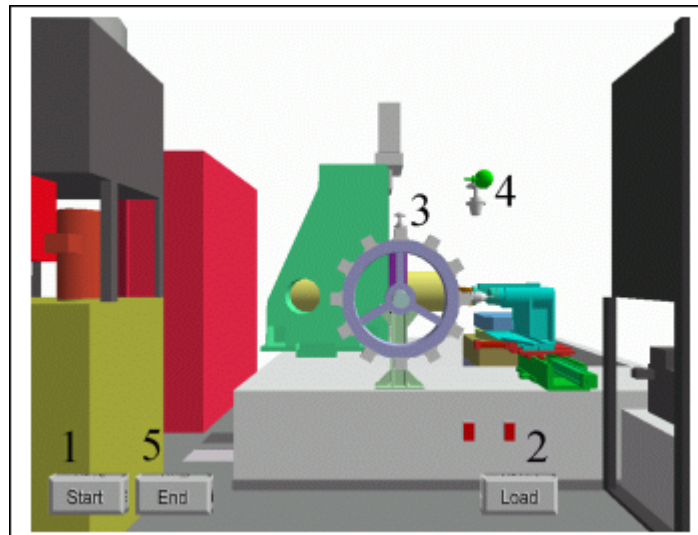


Abb. 20: Sensomotorisches Experiment: Um eine Protokolldatei zu öffnen, musste der (1) ‚Startbutton‘ gedrückt werden. Wurde als nächstes der (2) ‚Loadbutton‘ betätigt, so erschien ein (3) Werkzeugrad in der Szene, das aufgenommen und auf der Welle einer Werkzeugmaschine platziert werden sollte. Bei einer weiteren Betätigung des ‚Loadbutton‘ wurden (4) Werkzeuge in die Szene geladen, mit denen das Rad nacheinander bestückt wurde. Dabei galt es, das Rad nach jedem Montagevorgang nachzustellen und die Datei schließlich durch die Betätigung des (5) ‚Endbutton‘ zu schließen. Die Aufgabe integrierte ‚Point-and-Click‘ (1, 2, 5), ‚Pick-and-Place‘ (3) und ‚Peg-Insertion‘ (4) Elemente.

Das Szenario wurde auf einer Projektionsleinwand präsentiert, wobei die ‚Cursors‘ als farbige Kugeln abgebildet waren und ihre räumliche Lage durch einen Pfeil gekennzeichnet war. Materialkontakte und erfolgreich beendete Teilhandlungen wurden akustisch rückgemeldet.

Bei bimanuellen Eingaben ist eine Arbeitsteilung zwischen beiden Händen möglich: Während die nicht-dominante Hand zum Beispiel die einfachen ‚Point-and-Click‘ Handlungen übernehmen kann, kann sich die dominante Hand auf die motorisch anspruchsvollere ‚Pick-and-Place‘ Montage konzentrieren. Ebenso kann das Werkzeugrad mit der dominanten Hand bestückt und mit der nicht-dominanten Hand nachgestellt

werden. Die Teilnehmer wurden auf den Vorteil aufmerksam gemacht, aber nicht darauf verpflichtet. Durch die Wahlmöglichkeit sollte eine möglichst natürliche Anwendungssituation mit hoher externer Validität geschaffen werden.

Um möglichst allgemeingültige Aussagen zu generieren, wurden nur Standardeingaben und keine Spezialeingaben berücksichtigt. Als Eingabegeräte standen zwei PHANToMs und zwei Mausgeräte, eine positionsgesteuerte Standardmaus sowie eine geschwindigkeitsgesteuerte Spacemouse zur Verfügung:

Da das PHANToM in verschiedenen Versionen existiert, wurde sowohl ein PHANToM Desktop als auch ein PHANToM Premium mit Eingabestift verwendet. Beide Geräte unterscheiden sich vor allem in ihrem Arbeitsraum: Während beim PHANToM Desktop (16 x 13 x 13 cm) alle Eingaben aus dem Handgelenk erfolgen, erfordert das PHANToM Premium (19.5 x 27 x 37.5 cm) Bewegungen aus dem Schultergelenk. Das kleinere PHANToM Desktop lässt sich vermutlich mit der dominanten Hand besser steuern, wohingegen das größere PHANToM Premium seltener nachgesetzt werden muss und deshalb für die Eingabe mit der nicht-dominanten Hand besser geeignet erscheint.

Ebenso dürften mit der Spacemouse Eingaben mit der nicht-dominanten Hand besonders gut gelingen, da das elastische Gerät, im Gegensatz zu den PHANToMs und zur Standardmaus, nicht nachgestellt werden muss.

Die Standardmaus war nach der ‚Switching-Metapher‘ modifiziert, so dass durch das Gedrückthalten einer Maustaste Bewegungen in den Raum möglich waren.

Da alle vier Eingabegeräte sowohl ein- als auch beidhändig kommandiert werden können, ergeben sich zwanzig Kombinationen. Um die Probanden nicht zu überfordern, wurden mit Hilfe eines Addelman Plans sechs Bedingungen ausgewählt, die von jedem der 25 rechtshändigen Teilnehmer bearbeitet wurden (Addelman, 1962). Die restlichen Kombinationen wurden lediglich schriftlich beschrieben und die Probanden wurden am Ende des Experimentes gebeten, die beschriebenen Systemkombinationen entsprechend ihrer Präferenz zu ordnen. Um zu prüfen, ob eine konsistente Ordnung gelingt, wurden jeweils zwei Beschreibungen doppelt vorgelegt. Die Angaben können als zuverlässig bezeichnet werden, da Cronbach’s Alpha 0.84 beziehungsweise 0.85 betrug.

Während die Parameter Händigkeit und Eingabegerät die beiden unabhängigen Variablen darstellen, wurden als abhängige Variablen die Bearbeitungszeit, das Präsenzerleben und die Rangordnung erhoben.

3.3.1 Ergebnisse

Die abhängigen Variablen korrelieren signifikant¹³ miteinander, wobei hohes Präsenzepfinden sowohl mit einer schnellen Bearbeitung einhergeht als auch mit der vorgenommenen Rangordnung übereinstimmt. Da die Parameter nicht unabhängig voneinander sind, kann die Berechnung stellvertretend anhand der Rangordnung vorgenommen werden.

Um die bevorzugte Gerätekombination zu ermitteln, wurde eine Conjointanalyse durchgeführt (Luce & Tukey, 1964; Backhaus et al., 2000). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt:

	nicht-dominant	dominant
Ohne Eingabegerät	1.7864	---
PHANToM Premium	1.2709	-0.5023
PHANToM Desktop	-0.0687	1.4894
Spacemouse	-0.6937	-1.5847
Switchingmouse	-2.7449	0.5977

Tab. 5: Teilnutzen der Eingabegeräte: Jede Spalte ist einzeln zu betrachten, wobei sich eine höhere Bevorzugung in einem entsprechend höheren Zellenwert widerspiegelt. Die bevorzugte Gerätekombination ist grau unterlegt.

Die meisten Teilnehmer verzichteten lieber auf ein zweites Eingabegerät und bevorzugten eine einhändige Kommandierung. Würden sie dennoch beidhändig arbeiten, so wünschen sie sich ein PHANToM Premium für die nicht-dominante Hand. Das PHANToM Desktop und die Spacemouse wurden schlechter, aber wesentlich besser als die Switchingmouse bewertet.

Für die dominante Hand bevorzugten die Teilnehmer ein PHANToM Desktop. Die Switchingmouse wurde dem PHANToM Premium vorgezogen, wohingegen die Spacemouse weitgehend abgelehnt wurde. Die meisten Teilnehmer wünschen also eine einhändige Eingabe mit einem PHANToM Desktop in der dominanten Hand.

Auffallend ist, dass für die Eingabe mit der nicht-dominanten Hand die beiden Bedingungen ‚ohne Eingabegerät‘ und ‚mit PHANToM Premium‘ ähnlich gewertet wurden. Das Ergebnis lässt zwei Interpretationen zu: Erstens könnte es den Probanden egal sein, ob ihnen für die linke Hand keine Eingabe oder ein PHANToM Premium zur Verfügung steht. Zweitens könnte es sich um eine heterogene Stichprobe handeln, wobei ein Teil einhändig und der andere Teil beidhändig arbeiten möchte.

Um die Homogenität der Stichprobe zu untersuchen, wurde der Datensatz einer hierarchischen Clusteranalyse unterzogen, wobei als Proximitätsmaß die quadrierte euklidische Distanz berechnet wurde und zur Fusionierung ein Ward-Algorithmus herangezogen wurde. Bei der Berechnung bildeten sich drei Gruppen heraus, für welche die Teilnutzenwerte der Conjointanalyse getrennt ermittelt wurden (Tab. 6):

Gruppe	nicht-dominant			dominant		
	1 N=5	2 N=7	3 N=12	1 N=5	2 N=7	3 N=12
Ohne Eingabegerät	2.5513	2.0791	1.2969	---	---	---
PHANToM Premium	0.2302	1.2618	2.6098	-0.2671	-0.4835	-0.6113
PHANToM Desktop	-0.8514	0.0150	0.2086	0.5329	1.6022	1.8221
Spacemouse	-0.9314	-1.4708	-0.1414	-0.0786	-1.3495	-2.3495
Switchingmouse	-0.9987	-1.8851	-3.9739	-0.1871	0.2308	1.1387

Tab. 6: Teilnutzen der Eingabegeräte: In einer Clusteranalyse konnten drei Gruppen identifiziert werden, für welche die Conjointanalyse getrennt berechnet wurde. Die bevorzugten Gerätekombinationen sind grau unterlegt.

Die erste und die zweite Gruppe möchte nur mit einem PHANToM Desktop in der dominanten Hand arbeiten. Im Gegensatz zur zweiten lehnte die erste Gruppe eine beidhändige Eingabe strikter ab. Die dritte Gruppe unterscheidet sich von den anderen beiden, da sie sowohl mit einem PHANToM Desktop in der dominanten Hand als auch mit einem PHANToM Premium in der nicht-dominanten Hand arbeiten möchte.

Festzuhalten ist, dass die erste und die zweite Gruppe ein Eingabegerät bevorzugen, während die dritte Gruppe lieber beidhändig arbeitet. Für die nicht-dominante Hand wurde dabei das PHANToM Premium bevorzugt, also ein isotonisches Gerät, das aufgrund seiner mechanischen Konstruktion weiträumige Bewegungen unterstützt. Obwohl auch mit der elastischen Spacemouse ein großer Arbeitsraum abgedeckt werden könnte, wurde das Gerät, anders als vermutet, eher abgelehnt (H_{SMI}).

Betrachtet man die sensomotorischen Fähigkeiten, wie sie mit dem Wiener Testsystem erfasst worden sind, so zeichnet sich die beidhändige Gruppe durch höhere antizipative und reaktive Koordinationsleistungen aus: Diese Teilnehmer konnten zum einen die Geschwindigkeit bewegter Objekte besser einschätzen und zeigten zudem eine bessere Hand-Hand-Koordination.

Wie Abbildung 21 zeigt, sind beide Gruppen ungefähr gleich groß und es besteht im Durchschnitt kein systematischer Altersunterschied, so dass die Beobachtung tatsächlich auf verschiedene sensomotorische Fähigkeiten zurückzuführen ist. Folglich wird durch die bimanuelle Schnittstelle eine zusätzliche motorische Belastung impliziert, so dass nur Anwender mit höheren sensomotorischen Fähigkeiten von einem zweiten Standardeingabegerät profitierten (H_{SM2}).

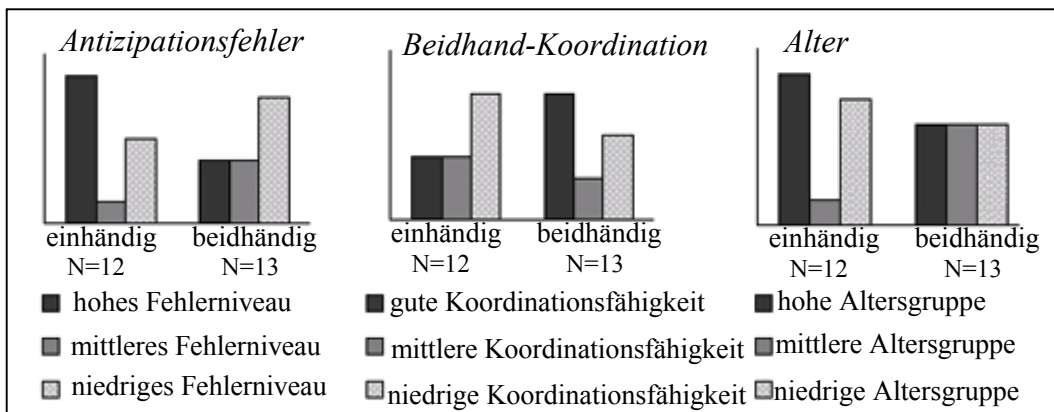


Abb. 21: Sensomotorische Moderatorvariablen: Anwender, die bevorzugt beidhändig arbeiten, zeichnen sich durch höhere sensomotorische Fähigkeiten aus. Sie weisen einen geringeren Antizipationsfehler (ZBA, S. 30) auf und verfügen zudem über eine bessere bimanuelle Koordinationsfähigkeit (2Hand, S. 30). Es besteht kein systematischer Altersunterschied.

Es bleibt schließlich zu klären, warum die beidhändige PHANToM-PHANToM-Kombination bevorzugt wurde. Betrachtet man die Teilnutzenwerte für die dominante Eingabe (siehe Tab. 5), so steht die Switchingmouse nach dem PHANToM Desktop an zweiter Stelle. Demnach kann die Maus-PHANToM-Kombination als bimanuelle Eingabe zweiter Wahl bezeichnet werden. Betrachtet man den prozentualen Anteil, mit dem die nicht-dominante beziehungsweise die dominante Hand zur Eingabe genutzt wurden, so wurden in beiden Bedingungen beide Hände fast gleich häufig eingesetzt (Tab. 7).

Die Bedingungen unterscheiden sich erst bei einer genaueren Betrachtung des räumlich-zeitlichen Eingabeverhaltens: Eine beidhändige Eingabe kann entweder simultan oder sequentiell erfolgen, indem zwei Eingabegeräte entweder gleichzeitig oder nacheinander bewegt werden. Waren zwei gleiche Eingabegeräte verfügbar, so wurde meistens simultan kommandiert; erfolgt die Eingabe hingegen mit einer Switchingmouse und mit einem PHANToM, so wurden beide Hände selten gleichzeitig, sondern fast immer

nacheinander bewegt. Zwei unterschiedliche Geräte scheinen demnach die motorische und kognitive Belastung zu erhöhen, während ‚echte‘ simultane beidhändige Eingaben nur bei symmetrischen Geräten zu beobachten waren (H_{SM3}).

	<i>dominant</i>	PHANToM	Switchingmouse
	<i>nicht-dominant</i>	PHANToM	PHANToM
dominant vs. nicht-dominant			
dominant		53.42	43.75
nicht-dominant		46.58	56.25
simultan vs. sequentiell			
simultan		75.00	18.52
sequentiell		25.00	81.48

Tab. 7: Symmetrische Gerätekombination: Vergleicht man die PHANToM-PHANToM-Kombination, mit der Maus-PHANToM-Kombination, so wurde beide Male sowohl rechts als auch links kommandiert (oben). Echte simultane Beidhändigkeit war aber nur zu beobachten, wenn zwei PHANToMs und damit zwei gleiche Geräte verfügbar waren (unten).

3.3.2 Diskussion

Von den untersuchten Standardeingaben kann nur das positionsgesteuerte, isotonische PHANToM Premium als Eingabegerät für die nicht-dominante Hand empfohlen werden. Der wesentliche Unterschied zum PHANToM Desktop besteht in der Größe des Arbeitsraumes. Würde man beim kleineren PHANToM alle Eingaben höher skaliert ausgeben, so könnte auch das Gerät für die nicht-dominante Hand geeignet sein. Obwohl das Ergebnis theoretisch plausibel ist, mag es auf den ersten Blick nicht zu erwarten sein: Das PHANToM Premium gilt, wie der Name bereits impliziert, als das bessere und größere Gerät, so dass es nahe liegt, es auch für die ‚gute‘ Hand zu reservieren.

Die geschwindigkeitsgesteuerte, elastische Spacemouse muss nicht nachgesetzt werden und kann deshalb ebenfalls einen großen Arbeitsraum abdecken. Das Gerät lässt sich zwar besser mit der nicht-dominanten als mit der dominanten Hand kommandieren, wurde aber insgesamt eher abgelehnt. Berücksichtigt man die differentialpsychologische Voruntersuchung, so ist das Ergebnis nachvollziehbar: Aufgrund der indirekten Abbildung zwischen Ein- und Ausgabe erfordert der geschwindigkeitsgesteuerte Modus wesentlich mehr Antizipationsfähigkeit und stellt damit höhere Anforderungen an den Benutzer (S. 35).

Festzuhalten ist, dass sowohl das PHANToM Premium als auch die Spacemouse besser mit der nicht-dominanten Hand kommandiert werden konnten als mit der dominanten Hand. Folglich lässt sich das Skalierungsprinzip von Guiard (1987) auch auf Telepräsenzsysteme anwenden und das zweite Eingabegerät sollte vor allem weiträumige Bewegungen unterstützen. Anders als vermutet, erwies sich aber nur das intuitivere, isotonische PHANToM Premium und nicht die elastische Spacemouse als Eingabegerät für die nicht-dominante Hand geeignet (H_{SM1}).

Trotz der vermeintlichen Zeit-Bewegungseffizienz und der plausiblen Zwei-Hand-Metapher ist eine bimanuelle Interaktion mit Standardeingabegeräten nicht für alle Anwender empfehlenswert. In dem Experiment profitierten nur Benutzer mit hoher antizipativer und reaktiver Koordinationsfähigkeit von einem zweiten Eingabegerät. Da eine erfolgreiche Kommandierung insbesondere eine gute Hand-Hand-Koordination erfordert, bestätigt sich die Vermutung, dass eine beidhändige Standardschnittstelle motorisch anspruchsvoll sein kann (H_{SM2}).

Schließlich dürfen auch Lern- und Gewöhnungseffekte bei der Interaktion nicht unterschätzt werden: Obwohl dreidimensionale Eingaben mit der modifizierten Standardmaus motorisch anspruchsvoll sind, konnte das Gerät aufgrund seiner hohen Vertrautheit in der dominanten Hand gut kommandiert werden. Trotz der hohen Präferenz waren allerdings vor allem sequentielle beidhändige Eingabehandlungen zu beobachten, wenn die Switchingmouse zusammen mit einem PHANToM kommandiert wurde. Um simultane beidhändige Eingaben beobachten zu können, sollte eine symmetrische bimanuelle Schnittstelle realisiert sein (H_{SM3}).

3.4 Zusammenfassung

In Telepräsenzsystemen können Bewegungen nie direkt, sondern immer nur indirekt über ein Eingabegerät vorgenommen werden. Damit die Auge-Hand- beziehungsweise die Hand-Hand-Koordination trotzdem gelingt, gilt es folgende Punkte zu beachten:

- Positionsgesteuerte, isotonische Geräte (z.B. Switchingmouse, Impulse Engine, PHANToM, Datenhandschuh) sind einerseits intuitiv, andererseits in ihrer Bewegung begrenzt. Da das Nachstellen nicht nur ermüdend ist, sondern zudem die

visuomotorische Koordination unterbricht, sollten die Geräte nur für Aufgaben eingesetzt werden, die kurz sind und sich auf einen kleinen Arbeitsraum beschränken.

- Geschwindigkeitsgesteuerte isometrische oder elastische Geräte (z.B. Spacemouse, Spaceball) erfordern Training, ermöglichen dann aber besonders präzise Bewegungen ohne Arbeitsplatzbeschränkungen. Die Geräte eignen sich für lange oder weiträumige Explorationen und erlauben erfahrenen Anwendern in Routinesituationen genauer und effizienter als mit einem positionsgesteuerten Mechanismus zu arbeiten.
- Mit der Implementierung eines zweiten Eingabegerätes liegt nicht gleichzeitig auch eine Schnittstelle vor, die einer einhändigen Technik überlegen ist. Die nicht-dominante Hand ist ungenauer, aber auch makrometrisch spezialisiert. Dementsprechend empfiehlt es sich, ein isotonisches Eingabegerät mit wenigen Gelenkbeschränkungen (z.B. PHANToM Premium) für die nicht-dominante Hand zur Verfügung zu stellen. Um ‚echte‘, simultane Beidhändigkeit zu unterstützen, sollten ferner gleiche Gerätetypen für beide Hände gewählt werden.
- Ein zweites Eingabegerät bietet manuelle und kognitive Vorteile, erfordert aber gleichzeitig auch motorische Fähigkeiten. Die Kommandierung von zwei Standard-eingabegeräten sollte deshalb Anwendern mit Erfahrung beziehungsweise höheren sensomotorischen Fähigkeiten vorbehalten sein. Um auch anderen Benutzern einen kognitiven, bimanuellen Referenzrahmen zu bieten, könnte zum Beispiel anstelle eines zweiten Eingabegerätes eine fiktive, virtuelle Hand vorgesehen sein.

4 Sensorische Aspekte

Während bislang die Eingaben in das Telepräsenzsystem im Vordergrund standen, soll nun die Gestaltung der Ausgabe betrachtet werden. Eine Ausgabe lässt sich durch zwei Dimensionen charakterisieren, nämlich durch ihre *Breite* und ihre *Tiefe* (Steuer, 1995; Zhao, 2003): Die Breite bezieht sich auf die Anzahl der angesprochenen Sinnessysteme, während die Tiefe den Umfang beschreibt, der innerhalb einer Modalität zur Verfügung steht, und damit auch als Bandbreite bezeichnet werden kann. Neben der Frage, wie breit eine Ausgabe mindestens zu gestalten ist, bereitet es in der Praxis vor allem Probleme, eine gewünschte Signaltiefe technisch zu realisieren.

4.1 Sensorische Breite

Während eine visuelle oder auditive Rückmeldung relativ leicht zu implementieren ist, stellt die Umsetzung des haptischen Feedbacks oft eine technische Herausforderung dar, so dass sich die Frage nach der optimalen sensorischen Breite hauptsächlich auf diese Modalität bezieht. In der Telepräsenzforschung wurden multimodale Ausgaben gezielt verbreitert beziehungsweise verschmälert, um zu prüfen, ob taktiler Feedback oder Krafterückmeldung für eine Aufgabe überhaupt notwendig ist.

Einige Untersuchungen beziehen sich auf teleoperative Explorationen und berücksichtigen vor allem die Bedeutung des taktilen Feedbacks: Howe et al. (1995) wählten ein für die Telemedizin relevantes Szenario. Ähnlich wie es für Chirurgen wichtig ist, Tumore in einem Gewebe zu lokalisieren, sollten die Probanden hier einen von Schaum umgebenen Gummizylinder auffinden. Die Leistungen verbesserten sich deutlich mit taktiler Rückmeldung. Lederman und Klatzky (1999) bestätigten das Ergebnis. Ohne eine entsprechende Stimulation der Fingerspitzen fiel es den Probanden merklich schwerer, einen Stahlball unter einer Schaumgummischicht aufzuspüren oder einen dünnen Nylonfaden zu finden. Bei Wellman und Howe (1995) sollten verschiedene Materialien, wie Silikon oder Aluminium, mit einem Stift berührt und im Paarvergleich unterschieden werden. Die Entscheidungsunsicherheit wurde deutlich reduziert, wenn vibrotaktiler Feedback vorgesehen war. Die Untersuchungen ergänzen sich und zeigen, dass taktiler Feedback für Explorationsaufgaben notwendig ist.

Auch wahrnehmungspsychologische Grundlagenuntersuchungen lassen eine ähnliche Schlussfolgerung zu (z.B. Heller & Schiff, 1991; Klatzky & Lederman, 2002):

Für Aufgaben, in denen physische Eigenschaften, wie die Temperatur, die Textur, die Konsistenz oder das Gewicht eines Gegenstandes, benötigt werden, ist der Tastsinn am Wichtigsten. Die Textur nimmt eine Sonderrolle ein, da hier die besten Ergebnisse erzielt werden, wenn der visuelle und der taktile Sinn zusammenwirken. Liegen aus beiden Kanälen widersprüchliche Signale vor oder ist die Beschaffenheit nicht gut sichtbar, wie das bei feinen Oberflächen der Fall ist, so dominiert der Tastsinn. In Aufgaben, in denen räumliche Signale über die Form, die Größe oder den Ort eines Gegenstandes benötigt werden, bestimmt der Sehsinn die Wahrnehmung. Da bei Explorationsaufgaben vor allem physische Materialeigenschaften verarbeitet werden, bestätigt das die obigen Untersuchungen zu Telepräsenzsystemen.

Bei ‚Point-and-Click‘, ‚Pick-and-Place‘, ‚Peg-Insertion‘ oder ‚Trackingaufgaben‘ werden in erster Linie räumliche und damit visuelle Signale benötigt, was die Relevanz des haptischen Feedbacks herabsetzen dürfte. Dementsprechend sind auch die Untersuchungen, die sich auf teleoperative Manipulationen beziehen, weniger eindeutig als die Literaturstellen zu den Explorationsaufgaben (Tab. 8): Während in 28 Prozent der gesichteten Arbeiten eine aktive Krafterückmeldung keine Verbesserung gegenüber einer visuellen Kontrollbedingung darstellte, wurde in 73 Prozent eine Verbesserung durch haptisches Feedback berichtet. Fasst man die Untersuchungen zusammen, so werden im Wesentlichen vier Feststellungen gemacht:

A) Telemanipulationen dauern erheblich länger als direkte manuelle Bearbeitungen: Adams et al. (2001) beobachteten, dass trainierte Probanden, selbst wenn Kraftfeedback vorgesehen war, fast viermal so lange benötigten wie ungeübte Probanden für eine manuelle Bearbeitung. Unger et al. (2002) bestätigten das Ergebnis und protokollierten außerdem höhere Kraft- und Positionsschwankungen bei einer Telemanipulation. Sie folgerten, dass sich die teleoperative Bearbeitung qualitativ von einer vergleichbaren manuellen Manipulation unterscheidet. Da die meisten Arbeiten haptisches Feedback aber mit einer visuellen Kontrollbedingung und nicht mit einer manuellen Bearbeitung vergleichen, liegen für eine abschließende Bewertung zu wenig empirische Ergebnisse vor.

Haptisches Feedback		nötig	unnötig
Point-and-Click	Massimino & Sheridan (1993) ³		■
	Engel et al. (1994)	■	
	Akamatsu (1995) ²	□	
	Repperger et al. (1995)	■	
	Payette et al. (1996)	■	
	Hasser et al. (1998) ⁷	■	
	Lindeman et al. (1999) ¹	■	
	Dennerlein & Yang (2001) ⁷	■	
Pick-and-Place	Kugath (1972)		■
	Brooks et al. (1990)	□	
	Ishii & Sato (1994)	□	
	Richard & Coiffet (1995)	□	
	Lindeman et al. (1999) ¹	■	
	Edwards (2000)		■
	Salnäss et al. (2000) ⁶		■
	Adams et al. (2001)		■
	Turner (2001)		■
	Salnäss & Zhai (2003) ⁶	□	
	Sankaranarayanan et al. (2003)	■	
	Petzold, Zaeh et al. (2004)	□	
Peg-Insertion	Hill & Salisbury (1977)	■	
	Hannaford et al. (1991)	■	
	Howe & Kontarinis (1992)	□	
	Massimino & Sheridan (1993)		■
	Massimino & Sheridan (1994)	■	
	Kontarinis & Howe (1995) ²		■
	Kontarinis & Howe (1995) ^{2, 4}	□	
	Gupta et al. (1997)	■	
	Gerovichev et al. (2002) ⁴	□	
	Lécuyer et al. (2002)		■
	Unger et al. (2002)	■	
Tracking	Akamatsu et al. (1992) ²	■	
	Gillespie et al. (1998)		■
	Campbell et al. (1999) ²	□	
	Fong et al. (2000) ⁵	■	
	Mücke (2000) ⁵	■	
	Wagner & Stylopoulos et al. (2002)	□	

Tab. 8: Haptisches Feedback bei Telemanipulationen: In einigen Studien zeigt sich eindeutig, ob Haptik notwendig ist oder nicht ■, andere finden nur eine Verbesserung entlang einer Dimension (z.B. Zeit oder Fehler) □ und wieder andere kommen zu dem Schluss, dass haptisches Feedback qualitativ zu verbessern sei □. Die meisten Arbeiten beziehen sich auf aktives Kraftfeedback, nur wenige auf passives Kraftfeedback¹⁾ oder eine taktile Rückmeldung²⁾. Einzelne Experimente lassen sich schwer zuordnen, weil sie Variationen, wie Tapping³⁾, Needle-Insertion⁴⁾ oder eine Fahrzeugsteuerung⁵⁾ beschreiben bzw. die Kooperation mehrerer Personen⁶⁾ oder 2D-Anwendungen⁷⁾ untersuchen.

B) Eine Krafrückmeldung stellt bei Telemanipulationen erst eine notwendige Ergänzung zum visuellen Feedback dar, wenn es sich um eine motorisch anspruchsvolle Aufgabe handelt, Verdeckungsprobleme vorliegen oder eine geringe Bildrate realisiert ist: Turner (2001) beobachtete, dass haptisches Feedback erst bei schwierigen Aufgaben bedeutsam wurde. Massimino und Sheridan (1994) stellten fest, dass das Kraftsignal wichtiger wurde, wenn sich die Probanden sehr nahe am Arbeitsobjekt befanden und aufgrund des geringen Schwinkels die Parallaxeinformation nicht nutzen konnten. Außerdem beobachteten sie, dass die Bedeutung des haptischen Kanals zunahm, sobald die Bildqualität abnahm. Auch Gerovichev et al. (2002) bestätigten die Relevanz des haptischen Feedbacks für unübersichtliche Aufgaben. Da in Telepräsenzsystemen oft schlechtere Sichtverhältnisse als bei der manuellen Aufgabenbearbeitung vorliegen, ist die höhere Bedeutung des haptischen Feedbacks nachvollziehbar.

C) Die Bedeutung von Kraftfeedback liegt vor allem darin, Greifkräfte zu reduzieren: In einigen Untersuchungen konnte die Wirksamkeit von Kraftfeedback nicht eindeutig nachgewiesen werden, so dass sich zum Beispiel entweder die Bearbeitung beschleunigte oder das Präsenzepfinden verbesserte (z.B. Brooks et al., 1990; Wagner & Stylopoulos et al., 2002; Salnäss & Zhai, 2003). Der Untersuchung von Petzold, Zaeh et al. (2004) liegt eine ‚Pick-and-Place‘ Mikromontage zu Grunde, bei der die Probanden ein Zahnrad auf einem Uhrwerk montieren sollten. Obwohl das Szenario zum Teil nur bedingt einsehbar war, konnte die Aufgabe mit Kraftfeedback nur etwas, aber nicht signifikant¹⁴ schneller bearbeitet werden als ohne eine Krafrückmeldung. Lediglich das Präsenzepfinden verbesserte sich signifikant¹⁵, wenn Kraftfeedback vorgesehen war. Haptisches Feedback schien demnach zwar hilfreich, aber nicht notwendig für die Bearbeitung der Aufgabe.

Untersuchungen, die anstelle von Bearbeitungszeit und Präsenzepfinden die aufgewendeten Greifkräfte als Erfolgskriterium zu Grunde legten, kommen zu einem eindeutigen Ergebnis: Während bei Teleoperationen ohne Kraftfeedback ungefähr zehnmal höhere Kräfte als bei vergleichbaren manuellen Manipulationen beobachtet wurden, trug haptisches Feedback erheblich zur Reduktion der Kräfte bei (Howe & Kontarinis, 1992; Richard & Coiffet, 1995; Turner, 2001; Wagner & Stylopoulos et al., 2002). Kraftfeedback scheint folglich nicht in erster Linie die Bearbeitungszeit zu reduzieren, sondern aufgrund geringerer Greifkräfte weniger Materialbeschädigungen zu verursachen.

D) 16 Prozent der Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass haptisches Feedback zu verbessern sei: In den Experimenten von Massimino und Sheridan (1993) wurden kleine Kräfte zum Beispiel durch die hohe Masse des Teleoperators beziehungsweise durch auftretende Reibungskräfte maskiert. Bei Ishii und Sato (1994) war das System mit haptischem Feedback schwerer zu steuern, da die durchschnittliche Bearbeitungszeit mit dem Vorhandensein von Kraftfeedback sogar zunahm. Zur Optimierung der haptischen Rückmeldung werden, neben einer technischen Verbesserung, eine Ergänzung der haptischen Modalität durch redundante Sinnessignale (4.1.1) beziehungsweise eine Übersetzung des Kraftsignals in andere Modalitäten (4.1.2) diskutiert.

4.1.1 Sensorische Ergänzung

Je breiter die sensorische Rückmeldung gestaltet ist, um so wahrscheinlicher ist es, dass sich die Sinnesreize aus verschiedenen Modalitäten ergänzen: Wellman und Howe (1995) konnten zum Beispiel die besten Ergebnisse beobachten, wenn Materialunterschiede nicht nur gefühlt, sondern gleichzeitig auch gehört wurden. Akamatsu et al. (1995) untersuchten eine ‚Point-and-Click‘ Aufgabe unter visueller, auditiver und taktiler Rückmeldung. Hier war der taktile Reiz zwar am wichtigsten, das Ergebnis aber am besten, wenn eine Rückmeldung auf allen drei Kanälen erfolgte. Kontarinis und Howe (1995) zeigten in mehreren Experimenten, dass Greifkräfte und Vibrationen kompatibel sind und beide Signale zusammen die Leistung – oder zumindest das Präsenzerleben – erhöhten.

Die Darbietung redundanter Signale in verschiedenen Formaten ist generell empfehlenswert, setzt aber voraus, dass zwei Reize in zeitlich-räumlicher Nähe stehen und als ein Ereignis wahrgenommen werden. Zuberbühler et al. (2002) bestimmten den ebenmerklichen Synchronisationsfehler zwischen dem visuellen und dem auditiven Kanal und stellten fest, dass Asynchronitäten bereits entdeckt wurden, wenn der auditive Reiz nur 105 Millisekunden nach dem visuellen Reiz erfolgte. Abhängig von der Aufgabe und der Modalität werden unterschiedliche Wahrnehmungsschwellen berichtet und auch große interindividuelle Unterschiede beobachtet (Levitin et al., 2000; von Hardenberg & Bérard, 2001; Watson et al., 2003). In allen Untersuchungen betrug das Zeitfenster für die multisensorische Integration aber nur wenige hundert Millisekunden (Colonus et al.; 2002).

Da in Telepräsenzsystemen jede Modalität mit einem anderen Gerät angesprochen wird, können derart geringfügige Interkanal-Verzögerungen oft nicht vermieden werden. Petzold, Zaeh et al. (2004) untersuchten in einer experimentellen Untersuchung mit 60 Teilnehmern die Auswirkungen einer asynchronen Ansprache der Sinneskanäle, indem die auditive Rückmeldung abhängig von der Versuchsbedingung entweder synchron oder verspätet zum visuellen Signal dargeboten wurde. In der Hälfte der Durchgänge war zudem eine haptische Rückmeldung vorgesehen. Die Verzögerung betrug konstant 250 Millisekunden und lag damit außerhalb des multimodalen Zeitfensters (Abb. 22). Eine sensorische Ergänzung, und damit eine sprunghafte Beschleunigung der Bearbeitung, war nur zu beobachten, wenn haptisches, auditives und visuelles Feedback synchron erfolgten. Die Untersuchung zeigte aber auch, dass eine multimodale Rückmeldung selbst dann vorgesehen sein sollte, wenn Interkanal-Verzögerungen nicht auszuschließen sind.

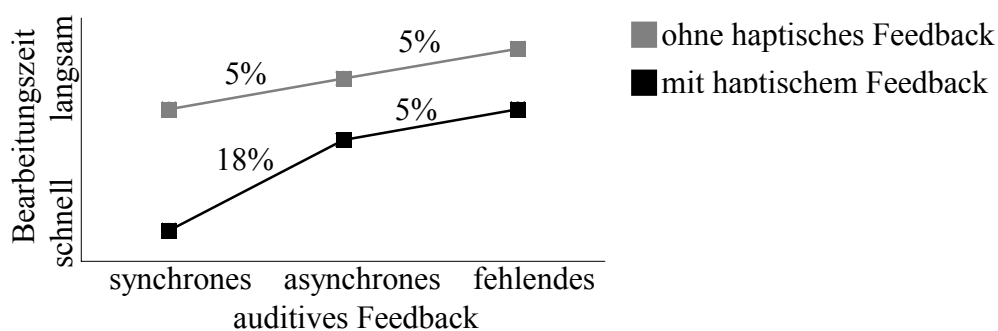


Abb. 22: Sensorische Ergänzung: Synchrones multimodales Feedback bewirkte eine sprunghaft schnellere Bearbeitung, aber auch eine asynchrone Ansprache der Modalitäten reduzierte gegenüber einer fehlenden Rückmeldung die Bearbeitungszeit (Petzold, Zaeh, Färber, Deml, Egermeier, Schilp & Clarke, 2004).

Neben Interkanal-Verzögerungen sind auch widersprüchliche Signale aus verschiedenen Sinneskanälen in Telepräsenzsystemen nicht immer zu vermeiden. Pavani et al. (2000) untersuchten die Folgen von *sensorischen Widersprüchen* mit einem Versuchsaufbau, in dem die gefühlte und die gesehene Position der Hand nicht übereinstimmten und stellten fest, dass die tatsächliche Lokalisation dann weitgehend vom visuellen Stimulus bestimmt wurde.

Dieses Phänomen wurde auch in einer Reihe wahrnehmungspsychologischer Untersuchungen beobachtet. Ein populäres Beispiel ist der so genannte ‚Bauchredner‘-Effekt: Wird ein auffälliger visueller Stimulus, wie eine Bauchredner-Puppe, zusammen mit einem Ton präsentiert, so gelingt es in der Regel nicht, die Richtung anzugeben, aus der

der Ton gehört wird, und man glaubt, die Puppe sprechen zu hören (Howard & Templeton, 1966). Basierend auf einer umfangreichen Literaturstudie und eigenen Experimenten kommen auch Soto-Faraco und Kingstone (2001) zu dem Schluss, dass sich bei multisensorischen Widersprüchen meistens visuelle Reize gegenüber haptischen und auditiven durchsetzen. Diese Dominanz wird auch als „*visual capture*“ bezeichnet (z.B. Biocca et al., 2001; S. 253).

Eine theoretische Erklärung dafür bietet das *Fusionsmodell der Wahrnehmung*, wonach die multimodale Wahrnehmung in zwei Schritten erfolgt (Jacobs, 2002): Zunächst werden visuelle, haptische und auditive Perzepte auf ihre Zuverlässigkeit hin beurteilt, um dann entsprechend gewichtet und zu einem einheitlichen Sinneseindruck kombiniert zu werden. Erstaunlich ist, dass das menschliche Gehirn eine statistisch optimale Integration anstrebt, so dass Ernst und Banks (2002) den dominanten Sinn mit einer Maximum-Likelihood Schätzung vorhersagen konnten. Auch Untersuchungen von Atkins et al. (2001) und Triesch et al. (2002) deuten darauf hin, dass sich das Ergebnis mathematisch vorhersagen lässt und die Zuverlässigkeit eines Hinweisreizes durch die Korrelation mit anderen Indikatoren beurteilt wird.

Liegen also aus einem oder verschiedenen Kanälen widersprüchliche Reize vor, so werden die Hinweise mit der höchsten Signaltiefe die Wahrnehmung dominieren. Die Gültigkeit des Prinzips lässt sich auch an einem alltäglichen Beispiel demonstrieren: Beim Betrachten eines Fernsehfilmes indiziert die Stereoparallaxe, dass alle Objekte in der gleichen Tiefe angeordnet sind, während Perspektive-, Textur- und Schattenhinweise implizieren, dass sich einige Objekte näher beim Betrachter befinden als andere. Da die räumliche Position durch mehrere visuelle Tiefenindikatoren zuverlässig abgebildet ist, wird die widersprüchliche Parallaxeinformation beim Fernsehen abgewertet und es resultiert eine stabile Tiefenwahrnehmung.

Festzuhalten ist, dass redundantes multimodales Feedback die Aufgabenausführung verbessern kann. Auf eine breite Stimulation verschiedener Sinneskanäle sollte aber selbst dann nicht verzichtet werden, wenn keine synchrone ($\approx 100\text{ms}$) Ansprache der Modalitäten möglich ist. Liegen allerdings widersprüchliche Signale vor, so wird keine sensorische Ergänzung, sondern eine sensorische Adaption zu beobachten sein: Der zuverlässigste, meist visuelle, Reiz wird dann die Wahrnehmung dominieren, während die anderen Reize adaptieren werden (England, 1995).

4.1.2 Sensorische Substitution

Der sensorische Apparat ist als ein ganzes, einheitliches System zu betrachten und nicht als einzelne Sinne, die nebeneinander bestehen. Bei einigen Menschen vermischen sich die Sinnesqualitäten sogar unwillkürlich und sie berichten davon, Farben zum Beispiel zu hören (Emrich et al. 2002). Das Phänomen der Synästhesie ist zwar sehr selten, es demonstriert aber eindrucklich die Fähigkeit des menschlichen Gehirns zur intermodalen Kodierung (Engelkamp, 1991).

Um zu klären, wie zuverlässig sich die Stimulation einer Modalität in einer anderen ausdrücken lässt, wurden so genannte ‚cross-modale Matchingversuche‘ durchgeführt und die Probanden zum Beispiel gebeten, eine gespürte Kraft auf die Lautheit eines Tones abzustimmen (Marks et al., 1986). Meistens gelingen solche Einschätzungen zuverlässig und der Zusammenhang lässt sich sogar mathematisch in sensorischen Größenfunktionen abbilden (Scharf & Houtsma, 1986).

Erfolgt die Rückmeldung über einen anderen als den eigentlich dafür vorgesehenen Kanal, so spricht man von *sensorischer Substitution*. In technischen Systemen wird das Feedback für gewöhnlich eingesetzt, wenn ein Kommunikationskanal zwar benötigt wird, aber nicht verfügbar ist (Popescu et al., 2002). Eine Variante besteht darin, eine Modalität, die sich nur unzureichend abbilden lässt, um eine redundante Substitutionsanzeige zu ergänzen. Diese Anreicherung wird als Augmentierung bezeichnet (engl. *to augment* anreichern). Da es in Telepräsenzsystemen oftmals schwierig ist, Kräfte überhaupt oder realistisch darzustellen, wurde vor allem mit taktilen, auditiven und visuellen Substitutions- und Augmentierungsdisplays experimentiert:

Massimino und Sheridan (1993) untersuchten die Wirksamkeit auditiver und vibrotaktile Kraftsignale, wobei die Kraft in eine entsprechende Tonhöhe beziehungsweise Vibrationsintensität übersetzt wurde. Die Krafrückmeldung erwies sich lediglich bei eingeschränkten Sichtbedingungen als überlegen. Erfolgte die Ausgabe, wie in Weltraummontagen, drei Sekunden verzögert, so war das Kraftfeedback – im Gegensatz zur auditiven und taktilen Substitution – instabil und unbrauchbar. Eine auditive Substitution war besonders dann wirkungsvoll, wenn die Teleoperation schnelle Reaktionen erforderte oder wenn geringe Kräfte vorlagen. Erforderte die Darstellung allerdings mehrere Freiheitsgrade, so wurde die auditive Substitution zu komplex und die Anwender kognitiv überfordert.

Cheng et al. (1996) ersetzten das Kraftfeedback in einer ‚Pick-and-Place‘ Aufgabe durch eine kostengünstigere taktile Vibrationsrückmeldung. Sie stellten fest, dass das Vibrationssignal insbesondere unerfahrene Benutzer unterstützte und die Aufgabe, im Vergleich zu einer visuellen Kontrollbedingung, schneller ausgeführt werden konnte. Bei dem Substitutionsdisplay traten allerdings höhere Greifkräfte als bei einer Kraftausgabe auf.

Richard und Coiffet (1995) verglichen die Wirksamkeit eines haptischen Displays mit einer auditiven beziehungsweise visuellen Kraftdarstellung. Sie zeigten, dass ein ‚Peg-Insertion‘ Szenario mit einer auditiven Kraftaugmentierung am schnellsten bearbeitet werden konnte; ein Kraftpfeil war nicht erfolgreich und verlangsamte die Bearbeitung. Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Kraftvisualisierung auf einer separaten Anzeige erfolgte und die Versuchspersonen ihre Blickrichtung ändern mussten, um die Rückmeldung zu nutzen.

Auch Lécuyer et al. (2002) experimentierten mit auditiver und visueller Kraftaugmentierung. Die visuelle Anzeige war als Pfeil gestaltet und kodierte sowohl die Kraftstärke als auch die Richtung zur Kollisionsvermeidung; die auditive Anzeige signalisierte Kollisionen lediglich durch einen kontinuierlichen Ton. Wenngleich der auditive Reiz zwar als gutes Warnsignal bewertet wurde, bewirkte weder haptisches Feedback noch eine andere Variante der Kraftanzeige eine Leistungsverbesserung. Da mit der visuellen Anzeige sogar mehr Kollisionen verursacht wurden, war die Darstellung vermutlich zu komplex.

In der Arbeit von Petzold, Zaeh et al. (2004) kamen sowohl visuelle als auch auditive Substitutions- und Augmentierungsdisplays zum Einsatz. Die visuelle Anzeige war als Pfeil gestaltet, der Stärke und Richtung der Kraft durch entsprechende Längen- und Richtungsänderungen darstellte. Die auditive Anzeige war als Warnsignal bei Kollisionen zu hören und verzichtete auf eine Kodierung des Kraftsignals. Weder die visuelle noch die auditive Darstellung hatten einen signifikanten Einfluss auf die Bearbeitungszeit; trotzdem zeigten sich durchgängige, deskriptive Unterschiede zwischen den Bedingungen (Abb. 23): Die Aufgabe wurden am schnellsten bearbeitet, wenn das Kraftsignal auditiv ① augmentiert wurde. Eine visuell-auditiv ② beziehungsweise eine rein visuelle Augmentierung ③ waren zwar ebenfalls wirkungsvoll, aber weniger effektiv als die auditive Anzeige alleine. Da zusätzliche sensorische Kraftstimuli die Bearbei-

tung gegenüber einer rein haptischen Rückmeldung ④ beschleunigten, sprechen die Ergebnisse für eine Augmentierung des Kraftfeedbacks.

Ebenso erwies sich der Einsatz von Substitutionsdisplays als sinnvoll: Vergleicht man die Bearbeitungszeiten, so bewirkten visuelle-auditiv ⑤ beziehungsweise auditive ⑥ Substitutionsanzeigen eine genauso schnelle Bearbeitung wie die haptische Rückmeldung alleine. Wie bereits auch in anderen Untersuchungen festgestellt wurde, konnte die Aufgabe allerdings ohne jegliche Rückmeldung ⑦ sogar schneller ausgeführt werden als mit einem visuellen Substitutionsdisplay ⑧. Eine visuelle Kraftkodierung schien folglich eher verwirrend als hilfreich zu sein.

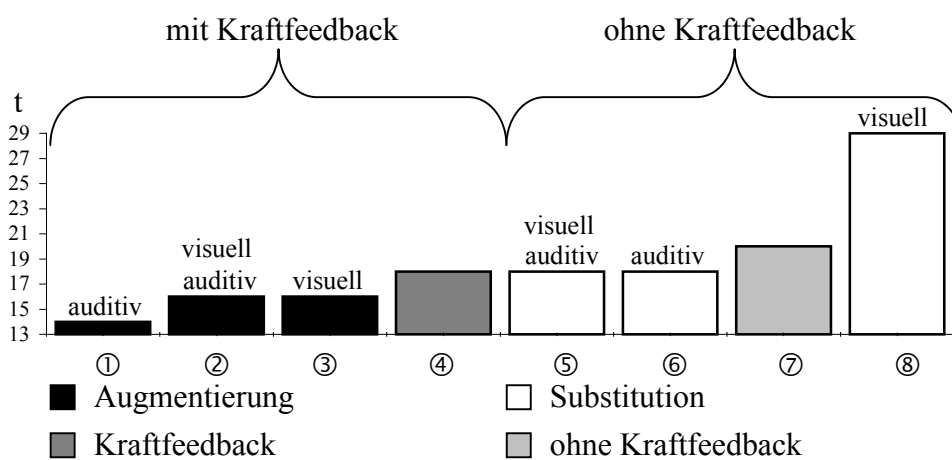


Abb. 23: Sensorische Substitution: Die Substitutions- und Augmentierungsdisplays sind aufsteigend nach der Bearbeitungszeit angeordnet. Ordnet man die Displays nach dem Präsenzzempfinden, so ändert sich die Reihenfolge geringfügig: ① ③ ② ④ ⑥ ⑦ ⑤ ⑧ (Petzold, Zaeh, Färber, Deml, Egermeier, Schilp & Clarke, 2004).

Festzuhalten ist, dass bei der derzeitigen Qualität des haptischen Feedbacks eine sensorische Anreicherung des Kraftsignals sinnvoll erscheint, wobei besonders schnelle Reaktionszeiten mit einer auditiven Augmentierung erzielt wurden. Für Tätigkeiten, in denen eine auditive Rückmeldung zu belastend wäre, wie das bei der teleoperativen Kampfmittelbeseitigung oder bei telechirurgischen Eingriffen der Fall ist, kann ein Kraftpfeil eine effektive Alternative darstellen (Massimino & Sheridan, 1993; Richard & Coiffet, 1995; Petzold, Zaeh et al., 2004).

Gilt es kleine Kräfte rückzumelden oder sind Systemlatenzen nicht auszuschließen, so sollte auf haptisches Feedback verzichtet werden und ein auditives Substitutionsdisplay eingesetzt werden. Visuelle Substitutionsanzeigen, wie Kraftpfeile, sind nicht zu empfehlen, da die Gefahr besteht, den Anwender kognitiv zu überfordern (Cheng et al., 1996; Lécuyer et al., 2002).

4.2 Sensorische Tiefe

Sensorische Ergänzung und Substitution zielen darauf ab, den Informationsgehalt der haptischen Rückmeldung durch eine breite, multimodale Anzeigengestaltung zu erhöhen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Modalitäten möglichst realitätsgetreu abzubilden. In der Wahrnehmungspsychologie und der Telepräsenzliteratur werden cross-modale Wechselwirkungen zwischen visuell-auditiven, haptisch-auditiven und visuell-haptischen Reizen geschildert, welche die Wahrnehmung qualitativ verändern und oft von unmittelbarem Nutzen für die Schnittstellengestaltung sind:

Eine Untersuchung zur *visuell-auditiven* Interaktion stammt von Davis et al. (1999). Die Teilnehmer sollten virtuelle Räume explorieren und sich darin befindliche Gegenstände, wie Bilder oder Bücherregale, einprägen. War ein akustisches Display vorgesehen, so wurden nicht nur die Objektproportionen als stimmiger und das eigene Gesichtsfeld als natürlicher erlebt, sondern es waren auch bessere Erinnerungs- und WiedererkennungslLeistungen zu beobachten. Dinh et al. (1999) konnten in einer groß angelegten Studie mit 322 Versuchspersonen den Einfluss auf die Gedächtnisleistung zwar nicht bestätigen, aber auch sie kommen zu dem Schluss, dass sich das Präsenzerleben weniger durch einen hohen visuellen Detaillreichtum als durch zusätzliche auditive Reize steigern lässt.

Storms (2002) kombinierte optische und akustische Displays unterschiedlicher Qualität und stellte unter anderem folgendes fest: Wird ein qualitativ hochwertiges optisches Display mit einem mittelmäßigen oder ebenfalls qualitativ hochwertigen Audiosystem kombiniert, so empfinden die Probanden das Bild als schärfer. Die Tatsache, dass ein Audiodisplay die empfundene Auflösung einer visuellen Szene verbessert, dürfte von einem Kosten-Nutzen Gesichtspunkt aus betrachtet für fast alle Telepräsenzschnittstellen relevant sein.

Die Ergebnisse von Miner et al. (1996) sprechen für die Existenz von *haptisch-auditiven* Interaktionen: Eine virtuelle Wand wurde als härter empfunden, wenn zeitgleich mit der Berührung ein kurzer Kontaktton zu hören war. Auch DiFranco et al. (1997) beobachteten, dass die Steifigkeit eines berührten Objekts überschätzt wird, wenn ein entsprechender Kontaktton verfügbar ist.

Srinivasan et al. (1996) untersuchten eine *visuell-haptische* Wahrnehmungssillusion und beobachteten, dass eine virtuelle Feder steifer beurteilt wurde, wenn sie visuell weniger

komprimiert wurde. Lécuyer et al. (2001) bestätigten den Einfluss der visuellen Deformierung auf das Steifigkeitsurteil.

Ähnliche Interaktionseffekte schildern Wall und Harwin (2001) für die Wahrnehmung von Texturen: Wurde eine simulierte Oberfläche mit einem PHANToM abgetastet, so wurde diese umso rauer empfunden, je größer der visuell sichtbare Rillenabstand war. Das Phänomen wurde auch in wahrnehmungspsychologischen Untersuchungen mehrfach empirisch belegt: Gerillte Metallplatten erscheinen rauer, wenn die Rillen dicker und weiter auseinander liegend dargestellt werden (Taylor & Lederman, 1975); Textilstoff wird rauer beurteilt, wenn die Webdichte abnimmt (LaMotte, 1977); Schmirgelpapier wird rauer geschätzt, wenn die Partikel größer sind (Stevens & Harris, 1962).

Die wohl bekannteste und am häufigsten untersuchte visuell-haptische Wechselwirkung ist die Größe-Gewichts-Illusion (Cross & Rotkin, 1975): Hebt man zwei Objekte mit gleichem Gewicht, aber unterschiedlichem Volumen, so wird das größere als schwerer empfunden. Der Effekt ist sogar dann wirksam, wenn die Versuchspersonen darüber aufgeklärt sind. Bedenkt man, dass es oft schwierig ist, harte Kontakte oder einen großen haptischen Wertebereich in Telepräsenzsystemen darzustellen, so ist die Praxisbedeutung offensichtlich.

Ellis und Lederman (1998) untersuchten die Ursache für diese cross-modalen Interaktionen und instruierten Versuchspersonen, das Gewicht von zwei Golfbällen zu schätzen. Wichtig zu wissen ist, dass beide Bälle zwar gleich schwer waren, Golfspieler aber zwischen verschiedenen Balltypen einen Gewichtsunterschied erwarten. Es zeigte sich, dass Golfspieler Übungsbälle signifikant schwerer schätzten als Turnierbälle des gleichen Gewichts; Nicht-Golfer hingegen schätzten beide Bälle als gleich schwer ein. Multisensorische Illusionen sind folglich erfahrungsabhängig: Nur weil wir eine Erwartung darüber haben, wie ein weiches oder ein hartes Objekt deformiert beziehungsweise wie es klingt, wenn es zu Boden fällt, wird unsere Empfindung entsprechend beeinflusst.

Festzuhalten ist, dass Wechselwirkungen zwischen den Modalitäten gezielt genutzt werden können, um die empfundene sensorische Tiefe einer Ausgabe zu optimieren. So können Audiodisplays die erlebte Bildqualität verbessern beziehungsweise geeignete visuelle oder auditive Stimuli Objekte schwerer oder härter erscheinen lassen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Anwender mit den Stimuli vertraut sind und eine Erwartung über ihr Verhalten aufgebaut haben. Ein Beispiel demonstriert die Praxisrelevanz cross-modaler Displays (Negroponte, 1995): Um eine Panzersimulation so realistisch

wie möglich zu gestalten, wurde die optische Displayqualität kontinuierlich optimiert bis schließlich die Kosten so hoch wurden, dass das Projekt nicht mehr finanzierbar schien. Als die Ausgabe alternativ um Motorengeräusche und um eine vergleichsweise günstige Bewegungsplattform ergänzt wurde, verbesserte sich der Realitätseindruck enorm. Es konnte am Ende sogar auf das teure optische Display verzichtet werden. Eine ähnliche Erfahrung schildern auch Popp und Färber (1997) bei Experimenten in einem Fahrsimulator.

4.3 Empirische Untersuchung

Obwohl zahlreiche Aspekte der sensorischen Reichhaltigkeit bereits facettenreich untersucht worden sind, ist die Bedeutung der Krafrückmeldung für Telemanipulationen noch nicht abschließend geklärt. Ein wesentlicher Grund dafür mag sein, dass in den meisten Untersuchungen haptisches Feedback gegen eine visuelle Kontrollbedingung getestet wird und die eigentlich entscheidende Frage, nämlich, inwieweit sich Teleoperationen und entsprechende manuelle Bearbeitungen unterscheiden, oftmals ausgeblendet wird (Adams et al., 2001; Unger et al., 2002). Der Aspekt bildet den Mittelpunkt der nachfolgenden Untersuchung, wobei die folgenden Hypothesen als Ausgangspunkt für weiterführende Explorationen dienen:

- H_{S1} Vergleicht man die teleoperative und die manuelle Bearbeitung einer Aufgabe, so dauert die Telemanipulation wesentlich länger (Adams et al., 2001). Das gilt selbst dann, wenn das Telepräsenzsystem eine höhere sensorische Reichhaltigkeit als ein entsprechendes manuelles Szenario aufweist.
- H_{S2} Kraftfeedback bewirkt nicht in erster Linie eine schnellere Bearbeitung, sondern trägt dazu bei, Kontaktkräfte und damit Beschädigungen zu minimieren (Turner et al., 2001; Wagner & Stylopoulos et al., 2002).
- H_{S3} Die Qualität des derzeit technisch möglichen haptischen Feedbacks wird als optimierbar empfunden (Campbell et al., 1999; Gerovichev et al., 2002).
- H_{S4} Selbst bei gleicher Tätigkeit unterscheidet sich eine Teleoperation qualitativ von einer manuellen Bearbeitung (Unger et al., 2002). Die Telemanipulation muss folglich nicht nur von unerfahrenen Benutzern erlernt werden, sondern erfordert auch das Umlernen manuell erfahrener Experten.

In den meisten Arbeiten steht die Tatsache im Vordergrund, dass Telemanipulationen eine geringere sensorische Reichhaltigkeit als entsprechende manuelle Bearbeitungen aufweisen. Für die nachfolgende Untersuchung wurde ein Szenario aus der minimal invasiven Chirurgie gewählt, bei dem das nicht zwingend erforderlich ist:

Um robotergestützte und manuelle Eingriffe gegenüberzustellen, wurden zunächst zwei Operationsszenarien aufgebaut (Abb. 24): Für die Teleoperation wurden zwei AESOP Roboterarme (Computer Motion Inc.) als Slavemanipulatoren eingesetzt. Während der eine starr und mit einem Stereolaparoskop ausgestattet war, war der andere beweglich und mit einem Skalpell versehen. Als Ersatz für einen Patienten diente eine Box, in die beide Roboterarme durch zwei Trokare eingeführt wurden. Der Operateur befand sich ungefähr drei Meter entfernt vom Operationstisch an einer Steuerkonsole. Dort wurden die Kameraaufnahmen auf einem Stereomonitor ausgegeben und als Mastereinheit stand ein PHANTOM zur Verfügung, das sich durch die Stiftmetapher gut zur Fernsteuerung des Skalpells eignete. Auch am manuellen Arbeitsplatz wurden ein Skalpell sowie ein Stereolaparoskop in die Patientenbox eingeführt und die Kameraaufnahmen auf einen Stereomonitor übertragen. Anders als bei der Roboteroperation manipulierte der Operateur das Skalpell allerdings unmittelbar am Operationstisch und es lag keine Fernsteuerung vor.



Abb. 24: Sensorisches Experiment: Bei der Teleoperation wurden zwei Roboterarme, die mit einem Stereolaparoskop und einem Skalpell ausgestattet waren, in eine Patientenbox eingeführt (links). Der Operateur kommandierte den Eingriff an einer räumlich getrennten Steuerkonsole (rechts).

Bedingt durch die hohe Reibung zwischen Operationsinstrument und Trokar, sind bei einem manuellen Eingriff die Kräfte, die zwischen Skalpell und Gewebe auftreten, kaum zu spüren. Durch die räumliche Trennung von Operateur und Operationsfeld ist es bei einem robotergestützten Eingriff hingegen möglich, eine von der Kontaktsituation entkoppelte Kraftmessung vorzunehmen und das Skalpell mit einem miniaturisierten Kraftmomentensensor auszustatten. Da die Kräfte sehr gering sind, stellt sich die Frage, ob und wie die Ausgabe zu skalieren ist. Die Kraftskalierung wurde während des Experimentes systematisch variiert (Abb. 25): In einer Bedingung wurden die Kräfte wie bei

einem manuellen Eingriff dargestellt; in den anderen vier Durchgängen wurde die Kraft jeweils um einen ebenmerklichen Unterschied höher skaliert ausgegeben. Unter einem ebenmerklichen Unterschied versteht man die Einheit einer psychophysischen Skala und damit die minimale physikalische Intensitätsänderung, die notwendig ist, damit ein Unterschied gerade noch wahrgenommen wird. Die psychophysische Funktion der Kraftskalierung wurde in einer Voruntersuchung mit zwölf Probanden nach der Konstanzmethode ermittelt (Fechner, 1860). Während der Wert x_0 der Krafrückmeldung bei einer manuellen Operation entspricht, markiert x_1 die Absolutschwelle. Die Kraft wird hier um 22 Prozent höher skaliert ausgegeben und ist damit empfindbar. Die Unterschiede zwischen x_1 und x_2 , x_2 und x_3 sowie x_3 und x_4 werden als eine ebenmerkliche Kraftskalierung (engl. *just noticeable difference, JND*) wahrgenommen.

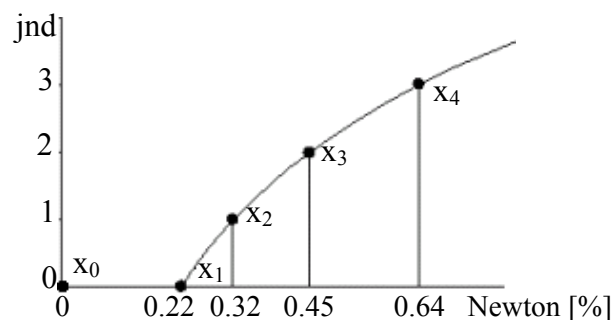


Abb. 25: Kraftfeedback beim robotergestützten Eingriff: Die psychophysische Funktion ordnet den ebenmerklichen Empfindungsunterschieden (Ordinate) die korrespondierenden physikalischen Reizintensitäten (Abszisse) zu. Während der Wert x_0 der Krafrückmeldung bei einer manuellen Operation entspricht, wurden die Kraftskalierungen x_1 , x_2 , x_3 , x_4 entsprechend dieser Funktion operationalisiert.

Anders als in der offenen Chirurgie kann das Operationsgewebe sowohl bei manuellen als auch bei robotergestützten minimal invasiven Eingriffen nur mit Hilfe einer Kameraaufnahme indirekt manipuliert werden. Da eine Krafrückmeldung nur bei der robotergestützten Operation verfügbar ist, zeichnet sich dieses Telepräsenzsystem durch eine höhere sensorische Reichhaltigkeit als die manuelle Bearbeitung aus.

Die Bedeutung der Krafrückmeldung lässt sich nur dann sinnvoll untersuchen, wenn haptisches Feedback für die Aufgabenerfüllung relevant ist. Als Operationsszenario wurde deshalb eine Trackingaufgabe mit Verdeckungsproblemen realisiert (siehe Massimo & Sheridan, 1994; Gerovichev et al., 2002): Eine von Gewebe umschlossene Arterie, die nur als Erhebung erkennbar war, sollte so schnell und vor allen Dingen so

verletzungsarm wie möglich frei präpariert werden; die Bearbeitungszeit war auf vier Minuten begrenzt (Abb. 26).

Um vergleichbare Versuchsbedingungen zu schaffen wurde kein organisches Gewebe verwendet, sondern alle Präparate mit einem Stempel angefertigt, wobei Gewebe durch Modelliermasse und Arterien durch Moosgummi ersetzt wurden. Trotz der Abstraktion war das Versuchsmaterial gut geeignet, um den Konsistenzunterschied zwischen Arterie und Gewebe nachzuempfinden.

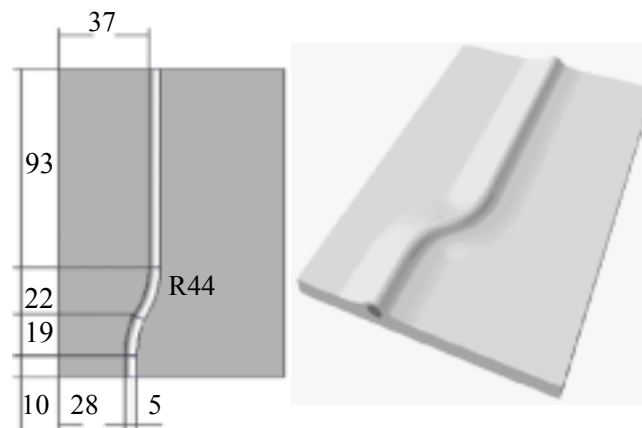


Abb. 26: Experimentalszenario: Die Probanden wurden instruiert, eine Arterie unter standardisierten Bedingungen zu präparieren, wobei alle Versuchspräparate die gleichen Abmessungen aufwiesen.

In der Untersuchung wurden zwei unabhängige Variablen umgesetzt: Zum einen wurden manuelle und robotergestützte Eingriffe gegenübergestellt, zum anderen wurden bei der Teleoperation fünf verschiedene Kraftskalierungen des Roboters operationalisiert. Als Versuchspersonen konnten überwiegend Chirurgen gewonnen werden, die Erfahrung mit minimal invasiven Operationstechniken hatten. Die Untersuchung war als Within-Subject Design gestaltet, so dass jeder der 25 Teilnehmer alle sechs Bedingungen durchlief.

Als abhängige Variable wurde die freigelegte Fläche gemessen, indem die Versuchspräparate mit einer Digitalkamera fotografiert wurden und die präparierte Arterienfläche mit der Bildanalysesoftware DigiTrace (Imatec GmbH) in Pixel umgerechnet wurde. Zudem wurden die Länge, die Tiefe und die Anzahl der Gewebe- und Arterienverletzungen erhoben. Hierzu wurden alle Versuchspräparate von drei verschiedenen Personen bewertet und die mittlere Übereinstimmung berechnet. Die Inter-Rater-Reliabilität war hoch und betrug 0.82. Um schließlich qualitative Unterschiede zwischen manuellen und robotergestützten Eingriffen zu explorieren, wurden die Teilnehmer interviewt und

alle Versuchsdurchgänge gefilmt. Die Inter-Rater-Reliabilität der Videoanalyse erwies sich als zufrieden stellend und betrug 0.74.

4.3.1 Ergebnisse

Vergleicht man manuelle und robotergestützte Eingriffe, so unterscheiden sich die beiden Bedingungen zwar nicht signifikant¹⁶ hinsichtlich der Gewebeverletzungen, wohl aber bestehen signifikante¹⁷ Unterschiede bezüglich der Tiefe der Arterienverletzungen und sogar sehr signifikante¹⁸ Unterschiede bezüglich der freigelegten Fläche (Abb. 27):

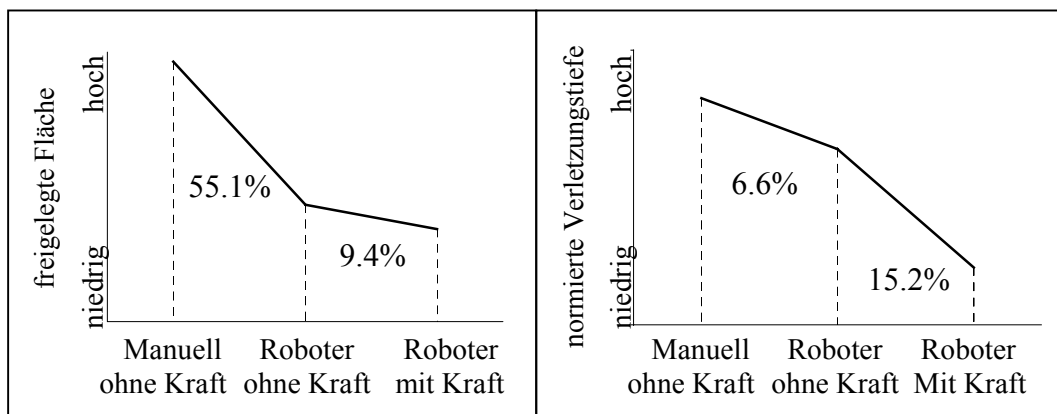


Abb. 27: Manuelle versus robotergestützte Eingriffe: Während bei einer manuellen Operation wesentlich schneller gearbeitet wird (links), wird bei einer (kraftrückkopplenden) Teleoperation weniger verletzt (rechts).

Bei der manuellen Operation wurde signifikant¹⁹ mehr Fläche freigelegt und damit schneller gearbeitet als mit dem Roboter. Anders als vermutet, wurde mit Kraftfeedback allerdings langsamer gearbeitet als ohne die haptische Rückmeldung. In der kraftskalierten Roboterbedingung wurde sogar um durchschnittlich 64.5 (55.1 + 9.4) Prozent weniger präpariert als bei der manuellen Bearbeitung.

Betrachtet man hingegen nicht die freigelegte Fläche, sondern die Tiefe der Arterienverletzungen, so waren die Verletzungen bei Robotereingriffen mit Kraftfeedback geringerer als bei Robotereingriffen ohne Kraftfeedback oder bei manuellen Eingriffen. Während mit dem Roboter etwas vorsichtiger gearbeitet wurde, wurde die Arterie bei der manuellen Operation im Mittel um 21.8 (6.6 + 15.2) Prozent tiefer, und damit signifikant²⁰ stärker verletzt.

Demnach weisen sowohl manuelle als auch teleoperative minimal invasive Eingriffe Vor- und Nachteile auf: Während manuelle Eingriffe wesentlich schneller sind, können kraftskalierte, robotergestützte Eingriffe Verletzungen minimieren (H_{S1}).

Die Ergebnisse mögen auf den ersten Blick mit einem Geschwindigkeits-Genauigkeits-Dilemma assoziiert werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass bei der Teleoperation nur deshalb weniger Verletzungen zu beobachten waren, weil auch langsamer gearbeitet wurde und nicht weil Kraftfeedback vorhanden war. Hierzu ist anzumerken, dass zur varianzanalytischen Berechnung die Anzahl der Verletzungen auf die freigelegte Fläche bezogen wurde. Durch diese Normierung wurde nicht die absolute, sondern die relative Anzahl der Verletzungen betrachtet und damit der Geschwindigkeits-Genauigkeits-Zusammenhang kontrolliert.

Aufschlussreich ist in dem Zusammenhang auch die Videoauswertung: Beim Präparieren wurden verschiedene Techniken, wie schneidende, klappende oder schabende Bewegungen angewandt. Wenngleich alle Techniken als erfolgreich zu bezeichnen sind, erhöht sich die Verletzungsgefahr vor allem beim Schneiden. Obwohl bei der Roboteroperation signifikant²¹ mehr Schnitte als bei der manuellen Operation durchgeführt wurden, wurden hier aber sogar weniger Verletzungen verursacht. Folglich ist die beobachtete Verletzungsreduktion tatsächlich auf das vorhandene haptische Feedback zurückzuführen (H_{S2}).

Entscheidet man sich für einen Robotereingriff, so stellt sich die Frage, wie die Kraft zu skalieren ist. Zwischen den untersuchten Kraftskalierungen konnten bei einer varianzanalytischen Betrachtung keine signifikanten²² Unterschiede aufgezeigt werden. Trotzdem ist ein durchgängiger, deskriptiver Effekt erkennbar (Abb. 28):

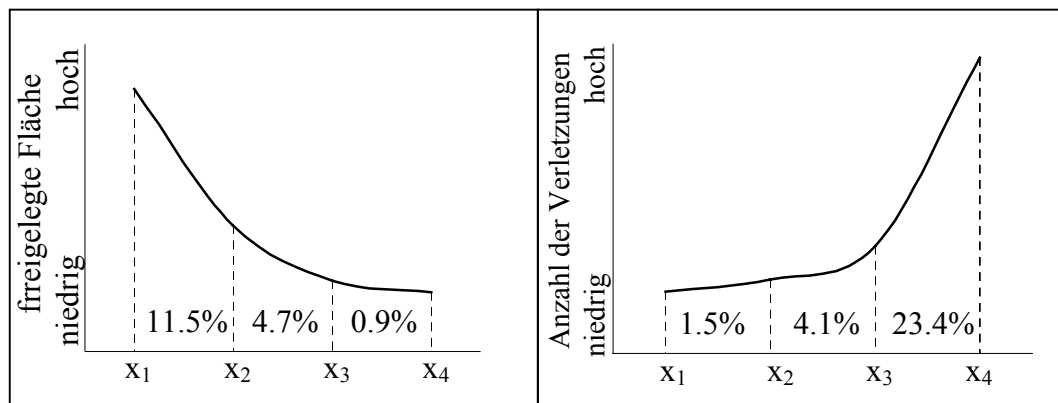


Abb. 28: Kraftskalierung: Mit steigender Kraftskalierung (Abszisse) nimmt die freigelegte Fläche (linke Ordinate) ab und die Anzahl der Verletzungen (rechte Ordinate) zu.

Je höher die Kraftskalierung war, umso weniger Fläche wurde freigelegt und umso höher waren die Anzahl der Arterienverletzungen. Folglich scheint es für dieses Operationsszenario sinnvoll, die Kraftskalierung nahe der Absolutschwelle zu wählen, da andernfalls mehr Verletzungen bei gleichzeitig langsamerer Bearbeitung zu beobachten waren.

Wie zu sehen ist verläuft die Ab- beziehungsweise Zunahme exponentiell: Bereits eine geringfügig stärkere Kraftskalierung bremste die Teilnehmer überproportional ab, aber erst mit einer hohen Kraftskalierung nahm die Anzahl ungewollter Verletzungen deutlich zu und das System schien schwerer zu steuern.

Die Beobachtung wird auch durch die subjektive Einschätzung der Probanden bestätigt: Lediglich 24 Prozent der Befragten konnten mit einer hohen Kraftskalierung (x_3 , x_4) umgehen und empfanden die Rückmeldung als informativer; 76 Prozent der Befragten bevorzugten hingegen eine geringe Kraftskalierung (x_1 , x_2) und argumentierten, dass sie nur dann das System stabil steuern konnten. Stellt man die Teilnehmer vor die Wahl, so würden sich 60 Prozent für die Krafrückmeldung entscheiden, wohingegen 40 Prozent lieber auf die Rückmeldung verzichten würden, da sie das Feedback als nicht differenziert genug empfanden. Ein Teilnehmer sprach in dem Zusammenhang zum Beispiel von einer „Schwarz-Weiß-Kraft“.

Festzuhalten ist, dass zwar die Mehrheit haptisches Feedback wünscht, die Qualität der Rückmeldung aber in zweifacher Hinsicht für verbesserungsfähig ansieht: Zum einen gilt es, den Krafteindruck durch einen größeren haptischen Wertebereich realistischer zu gestalten; zum anderen scheinen systemtechnische Umarbeiten notwendig, so dass auch höhere Kräfte stabil kommandierbar sind (H_{S3}).

Es bleibt schließlich zu klären, inwieweit Experten ihre manuelle Erfahrung auf die Te- leoperation anwenden konnten. Würde kein qualitativer Unterschied zwischen roboter- gestützten und manuellen Eingriffen bestehen, so müssten erfahrene Chirurgen beide Male bessere Leistungen als unerfahrene Kollegen erzielen (Tab. 9):

Wie eine Korrelationsanalyse zeigt, besteht bei der manuellen Operation ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen der freigelegten Fläche und der Erfahrung der Teilnehmer. Zudem weist die Erfahrung einen signifikant negativen Zusammenhang zur Anzahl der Arterien- und Gewebeverletzungen auf. Damit gilt: Je erfahrener ein Chirurg war, umso schneller und umso verletzungsärmer konnte die manuelle Bearbeitung

ausgeführt werden. Das Ergebnis war zu erwarten und spricht für die externe Validität der Untersuchung.

<i>Pearson-Korrelationskoeffizient</i>	(Erfahrung, Manuell)		(Erfahrung, Roboter)	
Freigelegte Fläche	0.536**	0.01	-0.416*	0.04
Anzahl der Arterienverletzungen	-0.480*	0.02	0.169	0.43
Anzahl der Gewebeerletzungen	-0.467*	0.02	0.406*	0.04
Länge der Arterienverletzungen	-0.182	0.38	0.731**	0.01
Länge der Gewebeerletzungen	-0.239	0.25	0.541**	0.01
Tiefe der Arterienverletzungen	0.304	0.16	0.594**	0.01
Tiefe der Gewebeerletzungen	-0.110	0.61	0.443*	0.03

Tab. 9: Erfahrung als Moderatorvariable: Die Korrelationsanalyse zeigt, dass erfahrene Chirurgen manuell schneller und verletzungärmer operierten, aber bei der kraftskalierten Teleoperation (x_2) langsamer waren und längere, tiefere Verletzungen verursachten. Signifikante* beziehungsweise sehr signifikante Zusammenhänge** sind grau unterlegt.

Erstaunlich ist allerdings, dass sich das Ergebnis umkehrt, wenn man die Roboteroperation betrachtet. Hier korreliert die Erfahrung signifikant negativ mit der freigelegten Fläche, aber zum Teil signifikant positiv mit den Verletzungen. Folglich wurde umso langsamer gearbeitet und umso mehr Gewebeerletzungen verursacht, je mehr konventionelle Erfahrung ein Operateur vorzuweisen hatte. Ebenso nahmen auch die Länge und die Tiefe der Verletzungen mit der Erfahrung zu. Konventionelle Operationserfahrung schien demnach für die die Roboteroperation nicht hilfreich, sondern sogar störend gewesen zu sein. Die Beobachtung lässt sich anhand der Videoanalyse präzisieren (Abb. 29):

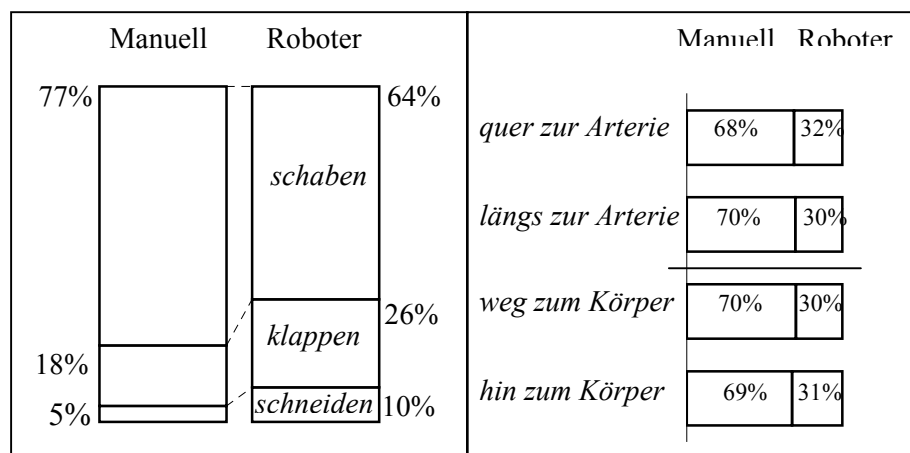


Abb. 29: Bewegungsmuster: Robotergestützte Operationen erfordern keine qualitativ unterschiedlichen Bewegungsmuster (links), aber eine geringere Bewegungsdynamik als manuelle Operationen (rechts).

Unabhängig davon, ob manuell oder robotergestützt präpariert wurde, waren schneidende, klappende und schabende Bewegungen zu beobachten. Obwohl sich beide Bedingungen quantitativ unterscheiden und in der Teleoperation zum Beispiel doppelt soviel geschnitten wurde, liegen keine qualitativ unterschiedlichen Bewegungsmuster vor. Beide Bedingungen unterscheiden sich erst, wenn man die Bewegungsdynamik betrachtet: Bei der manuellen Bearbeitung wurde sowohl häufiger quer als auch längs zur Arterie präpariert. Ebenso wurde die Arbeitsrichtung öfter gewechselt und sowohl häufiger weg als auch zum Operateur präpariert. Folglich erforderte die Teleoperation keine qualitativ anderen, wohl aber kontinuierlichere Bewegungen (H_{S4}).

4.3.2 Diskussion

Manuelle Eingriffe und robotergestützte Teleoperationen unterscheiden sich vor allem durch die fehlende beziehungsweise vorhandene Fernsteuerung voneinander. Beide Male wird, anders als in der offenen Chirurgie, das Gewebe nicht unmittelbar gesehen und betastet, sondern mit Hilfe einer Kameraaufnahme indirekt manipuliert. Da die Versuchsteilnehmer aber, trotz der Gemeinsamkeiten, manuell doppelt so schnell operierten wie mit dem Roboter, kann die beobachtete Zeitdifferenz nur auf die Kommunikationsbarriere und die Trägheit des Telemanipulators zurückgeführt werden. Auffallend ist allerdings, dass sich die Bearbeitung um mehrere Minuten verlangsamt, während die Datenübertragungs- und Verarbeitungszeiten um ein Vielfaches kleiner waren und lediglich wenige Sekunden betragen.

Nach Ware und Balakrishnan (1994) lässt sich die in Telepräsenzsystemen benötigte Bearbeitungszeit T_i nicht als Summe aus manueller Bearbeitungszeit T_m und der durch das System benötigten Zeit T_s beschreiben. Ausgehend vom Fitts'schen Gesetz (1954) postulierten sie, dass die systembedingte Zeitverzögerung T_s und die entsprechende menschliche Informationsverarbeitungszeit T_i multiplikativ mit einer empirischen Konstante C und der Aufgabenschwierigkeit ID (*index of difficulty*) zu gewichten seien (1). Das Modell erwies sich als robust, um die mittlere Bearbeitungszeit für virtuelle Greifaufgaben zuverlässig vorherzusagen.

$$T_i = T_m + C \cdot (T_i + T_s) \cdot ID \quad (1)$$

Bedenkt man, dass mit dem Master-Slave-Aufbau geringfügige Latenzen verursacht worden sind und das Operationsszenario als motorisch sehr anspruchsvoll zu klassifizie-

ren ist, so wird der hohe Zeitunterschied zwischen der manuellen und der teleoperativen Bearbeitung nachvollziehbar (siehe Çavuşoğlu et al., 2002). Verzögerungen dürfen demnach selbst bei minimalen Rechenzeiten nicht vernachlässigt werden und es scheint unvermeidbar, dass insbesondere motorisch anspruchsvolle Telemanipulationen um ein Vielfaches länger dauern als vergleichbare manuelle Bearbeitungen (H_{S1}).

Während Kraftfeedback in einigen Untersuchungen die Bearbeitung beschleunigte, konnte das Ergebnis trotz bestehender Verdeckungsprobleme in diesem Experiment nicht bestätigt werden (z.B. Brooks et al., 1990). Wie bei Ishii und Sato (1994) nahmen die Bearbeitungszeiten mit ansteigender Kraftskalierung sogar kontinuierlich zu. Die hauptsächliche Bedeutung der Krafrückmeldung bestand hier darin, Materialbeschädigungen zu reduzieren: Auch wenn mit dem Roboter insgesamt vorsichtiger gearbeitet wurde, bewirkte erst das Vorhandensein von Kraftfeedback eine entscheidende Reduktion der Verletzungen. Haptisches Feedback dürfte sich deshalb, wenn überhaupt, nur indirekt auf die Bearbeitungszeit auswirken, indem durch die genauere Bearbeitung weniger Zeit für nachträgliche Korrekturen benötigt wird. In der Praxis sollten manuelle und robotergestützte minimal invasive Operationstechniken folglich situationspezifisch eingesetzt werden: Eingriffe, in denen eine fast doppelt so lange Operationsdauer die Patienten zu sehr belasten würde, sollten manuell durchgeführt werden. Demgegenüber sollten Eingriffe, bei denen jede zusätzliche Verletzung kritisch wäre, mit einem kraftrückkoppelnden Roboter manipulator ausgeführt werden. Für dieses Operationsszenario erwies sich eine ebenmerkliche Kraftskalierung über der Absolutschwelle als optimal; höhere Kraftskalierungen waren wesentlich schwerer zu steuern (H_{S2}).

Aus dem Experiment haben sich zwei Forderungen an die haptische Displayentwicklung ergeben: Zum einen gilt es, regelungstechnische Optimierungen vorzunehmen, so dass auch höhere Kraftausgaben stabil steuerbar sind. Zum anderen wurde der Wertebereich der haptischen Rückmeldung als nicht differenziert genug empfunden. Die in der Literatur beschriebenen Regelungsarchitekturen zeichnen sich entweder durch ihre Stabilität oder durch ihre Transparenz aus, so dass die bestehenden Restriktionen derzeit nur schwer technisch zu überwinden (Sherman et al., 2000). Eine sinnvolle Alternative stellt deshalb der Einsatz von Augmentierungsdisplays dar. Da im Operationssaal jedes unnötige Geräusch als Störquelle empfunden wird, lassen sich in diesem Umfeld allerdings lediglich visuelle Kraftpfeile umsetzen (H_{S3}).

Damit sich robotergestützte Operationen in der Praxis etablieren können, ist neben einer Verbesserung der Qualität des Feedbacks auch die Schulung der Chirurgen entscheidend. Die Beobachtung von Unger et al. (2002), dass sich eine Telemanipulation qualitativ von einer manuellen Bearbeitung unterscheidet, kann so nicht bestätigt werden, sondern muss differenzierter betrachtet werden: In diesem Experiment erforderte die erfolgreiche Kommandierung des Medizinroboters keine qualitativ unterschiedlichen Bewegungsmuster, wohl aber eine andere Bewegungsdynamik. Versuchsteilnehmer, die auf dynamische Bewegungsänderungen verzichteten, konnten mit der Trägheit des Systems beziehungsweise mit den minimalen Zeitverzögerungen besser umgehen. Problematisch ist, dass insbesondere konventionell erfahrene Chirurgen dazu tendierten, die gewohnte manuelle Bewegungsdynamik auf das Telepräsenzsystem zu übertragen. Um Roboteroperationen erfolgreich durchführen zu können, müssen erfahrene Chirurgen deshalb umlernen beziehungsweise angehende Chirurgen neben der manuellen Arbeitsweise eine zweite Technik erlernen. Berücksichtigt man die hohe Bedeutung, die der Fähigkeit zur Bewegungsantizipation (S. 35) bei der differentialpsychologischen Untersuchung zukam, so ist in diesem Bereich auch der Einsatz von Auswahlverfahren zu erwägen (H_{S4}).

4.4 Zusammenfassung

In Telepräsenzsystemen stellt insbesondere die Ansprache des haptischen Kanals eine technische Herausforderung dar. Aus dem Grund ist es notwendig zu wissen, wann diese Rückmeldung für die Aufgabenausführung überhaupt erforderlich ist:

- Für Explorationsaufgaben, in denen Konsistenzunterschiede zu verarbeiten sind, wie das zum Beispiel in der medizinischen Diagnostik von Gewebeverhärtungen der Fall ist, sollte ein taktiles Display vorgesehen sein.
- Für Manipulationen, wie ‚Point-and-Click‘, ‚Pick-and-Place‘, ‚Peg-Insertion‘ oder ‚Trackingaufgaben‘, die motorisch wenig anspruchsvoll und zudem gut einsehbar sind, ist eine Krafrückmeldung zwar hilfreich, aber nicht notwendig.

Befindet sich der Anwender allerdings sehr nahe am Arbeitsobjekt, treten Verdeckungsprobleme auf, liegt eine geringe Bildrate vor oder handelt es sich um eine motorisch anspruchsvolle Aufgabe, so sollte auch hier eine Krafrückmeldung vorgesehen sein. Das Kraftfeedback wird dann allerdings nicht in erster Linie die Bear-

beitung beschleunigen, sondern Greifkräfte und damit Materialbeschädigungen reduzieren.

Erfordert die Aufgabe eine Krafrückmeldung, so lässt sich die Qualität des derzeit technisch möglichen haptischen Feedbacks durch den Einsatz von Augmentierungsdisplays verbessern. Eine visuelle Augmentierung mit einem Kraftpfeil ist zwar effektiver als das haptische Feedback alleine, aber weniger wirkungsvoll als eine auditive Augmentierung. Obwohl sich der Nutzen eines Augmentierungsdisplays bei einer synchronen ($\approx 100\text{ms}$) Ansprache der Modalitäten deutlicher zeigt, sollte eine sensorische Anreicherung selbst dann vorgesehen sein, wenn Interkanal-Verzögerungen nicht auszuschließen sind.

Liegen lange Systemantwortzeiten von mehr als drei Sekunden vor oder ist der Quotient aus maximaler Ausgabekraft und auftretender Reibung gering, so sollten anstelle einer haptischen Rückmeldung auditive Substitutionsdisplays verwendet werden. Diese sind sogar dann wirkungsvoll, wenn auf eine Kodierung des Kraftsignals in eine entsprechende Tonhöhe beziehungsweise Lautheit verzichtet wird. Optische Substitutionsdisplays können eine kognitive Überforderung der Anwender verursachen und sind deshalb nicht zu empfehlen.

Legt man die reale Wahrnehmung als Gestaltungsziel zu Grunde, so müssen die derzeit verwendeten Displays oftmals als ungenügend bezeichnet werden. Hier kann es von unmittelbarer Praxisrelevanz sein, Wahrnehmungssillusionen für die Schnittstellengestaltung zu nutzen:

- Um den Wertebereich einer haptischen Anzeige zu erhöhen, eröffnen Interaktionen zwischen der haptischen und der visuellen beziehungsweise der auditiven Modalität effiziente Gestaltungsmöglichkeiten: Wird eine Oberfläche visuell grobkörniger gestaltet, so wird sie rauer empfunden; wird ein Objekt visuell weniger komprimiert und ertönt bei dessen Berührung ein kurzer, hochfrequenter Kontaktton, so erscheint es härter; wird ein Objekt bei gleichem Volumen größer dargestellt, so wird es als schwerer erlebt.
- Cross-modale Wechselwirkungen können auch dazu beitragen, finanzielle und technische Restriktionen bei der optischen Displaygestaltung zu überwinden: Wird ein qualitativ hochwertiges optisches Display mit einem mindestens mittelmäßigen Au-

diosystem kombiniert, so werden die Anwender das Bild als schärfer empfinden und die Szene als realistischer erleben.

Unabhängig davon, wie sensorisch reichhaltig ein Telepräsenzsystem gestaltet ist, werden Teleoperationen allerdings wesentlich länger dauern als entsprechende manuelle Bearbeitungen. Die benötigte Bearbeitungszeit lässt sich nicht als Summe aus manueller Bearbeitungszeit und systembedingter Zeitverzögerung beschreiben, sondern erfordert eine multiplikative Gewichtung mit der Aufgabenschwierigkeit. Folglich verlängern sich insbesondere motorisch anspruchsvolle Aufgaben selbst bei minimalen Latenzzeiten um ein Vielfaches. Telemanipulationen erfordern dadurch zwar keine qualitativ anderen Bewegungsmuster, aber eine geringere Bewegungsdynamik. Die Fähigkeit, Eingaben kontinuierlich auszuführen und die Bewegungen des Telemanipulators zu antizipieren, stellen deshalb eine Schlüsselqualifikation für eine erfolgreiche Kommandierung dar. Das kann vor allem von manuell erfahrenen Experten ein Umlernen erfordern.

V Gestaltungsempfehlungen

Während für die zweidimensionale Mensch-Computer Interaktion ein strukturierender Forschungsansatz bereits etabliert ist, zeichnet sich eine systematische Evaluation von Telepräsenzsystemen derzeit erst ab (Bowman et al., 2002; Conkar et al., 1999; Kaur et al., 1999; Mills & Noyes, 1999):

In einigen Arbeiten werden klassische ‚*Usability*‘ Methoden auf die iterative Weiterentwicklung spezifischer Telepräsenzsysteme angewandt (Bowman et al., 2001; Tromp et al., 2003). Andere Arbeiten verfolgen nicht die sequentielle Optimierung einer konkreten Zielanwendung, sondern versuchen die Entwicklung von Telepräsenzsystemen mit möglichst allgemeingültigen Gestaltungsaussagen zu unterstützen. Diese Ansätze basieren zum Beispiel auf virtuellen *Testbed-Evaluationen*, wobei hier vor allen Dingen VEPAB (Virtual Environment Performance Assessment Battery) und VRMAT (Virtual Reality Manipulation Assessment Testbed) hervorzuheben sind (Lampton et al., 1994; Poupyrev et al., 1997). Im Mittelpunkt stehen dabei experimentelle Versuchsumgebungen mit einem generalisierbaren und wieder verwendbaren Evaluationsszenario.

Ein langfristiges Ziel der Testbed-Evaluationen kann darin bestehen, die Ergebnisse zu einem Gestaltungskatalog zu verdichten, der Systementwicklern eine leicht handhabbare Bewertung ihrer Anwendung erlaubt (Williams & Harrison, 2001). Dieser Einsatz von Gestaltungsrichtlinien wird auch als *heuristische Evaluation* bezeichnet (siehe Nielsen, 2001). Als eines der ersten Instrumente ist hier MAUVE (Multicriteria Assessment of Usability for Virtual Environments) zu nennen (Stanney et al., 2003). Um die Mensch-System-Schnittstelle in Telepräsenzsystemen systematischer gestalten zu können, bedarf es weiterer solcher Verfahren. Ziel ist es deshalb, die empirischen Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit sowie die Erkenntnisse der Literaturrecherche zu einem computerbasierten Evaluationssystem zusammenzufassen.

1 Heuristische Evaluation

Bei MAUVE handelt es sich um ein computergestütztes Bewertungssystem für virtuelle Umgebungen, das auf einer umfangreichen Literaturrecherche basiert (z.B. Gabbard et al., 1999; Kalawsky, 1999; Witmer & Singer, 1998). Die Evaluation berücksichtigt so-

wohl allgemeine Aspekte der Mensch-Computer-Interaktion, wie die Umsetzung von Gestaltgesetzen, als auch für virtuelle Umgebungen spezifische Aspekte der Ein- und Ausgabegestaltung. Der Benutzer gewichtet die verschiedenen Aspekte zunächst und nimmt dann fragebogengestützt eine Systembewertung vor. Die Ergebnisse werden schließlich in Form von Prozentangaben dargestellt, welche die Güte des ganzen Systems sowie der einzelnen umgesetzten Aspekte widerspiegeln.

Das hier entwickelte Verfahren, der ‚*PRESENCE – Design Guide*‘, unterscheidet sich von MAUVE vor allem in zwei Punkten: Da sich das Präsenzerleben auf die subjektive Empfindung eines Anwenders bezieht, scheint es sinnvoller, dieses Kriterium nicht durch den Systementwickler, sondern direkt durch den Endanwender erfassen zu lassen. Zudem will das Verfahren nicht in erster Linie bereits bestehende Systeme bewerten, sondern die Systementwicklung zielgerichtet unterstützen, noch bevor eine entsprechende Anwendung umgesetzt worden ist. Da eine Rückmeldung in Form von Prozentangaben keine konkreten Handlungsempfehlungen bereitstellt, erscheint diese Ergebnisaufbereitung nur zur Diagnose des Präsenzerlebens sinnvoll. Die weitere Auswertung erfolgt in Form von verbalen Gestaltungsrichtlinien.

Der Benutzer kann zunächst neben dem Literaturverzeichnis zwischen den Menüpunkten ‚Präsenzfragebogen‘ und ‚Design Guide‘ auswählen (Abb. 30):

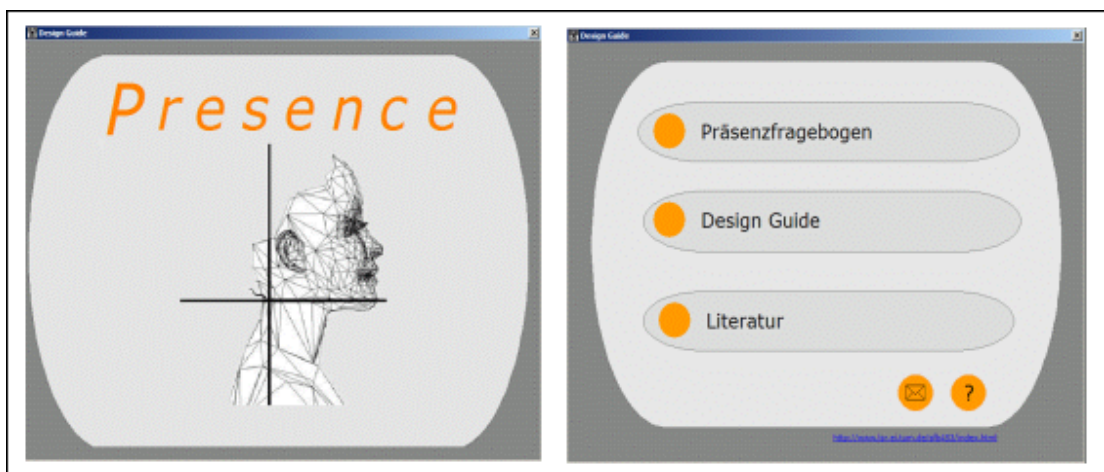


Abb. 30: *PRESENCE – Design Guide*: Der Benutzer kann neben dem Literaturverzeichnis zwischen den Menüpunkten ‚Präsenzfragebogen‘ und ‚Design Guide‘ wählen.

Der ‚*Präsenzfragebogen*‘ basiert auf dem Verfahren von Scheuchnplflug (2001), das auch in den empirischen Untersuchungen dieser Arbeit eingesetzt worden ist (Abb. 31). Der Anwender wird dabei durch einen Fragebogen geführt, der am Ende automatisch

ausgewertet wird. Die Ergebnisaufbereitung erfolgt hier, wie bei MAUVE, in Form von Prozentangaben. Dabei wird zum einen ein Gesamtwert präsentiert, der den Anteil des geäußerten Präsenzerlebens auf den Maximalwert bezieht und so einen ersten Überblick ermöglicht, inwieweit die Anwendung als gelungen zu bezeichnen ist. Zum anderen werden für die drei Subskalen – Schnittstellenqualität, räumliches Präsenzerleben und Involvierung – Einzelwerte berechnet, wobei der niedrigste Wert farblich markiert ist. Unabhängig von der bereits realisierten Güte kann der Entwickler so die spezifische Schwachstelle der Anwendung erkennen und die markierte Subskala als Stellschraube verstehen, um zielgerichtete Optimierungen einzuleiten.

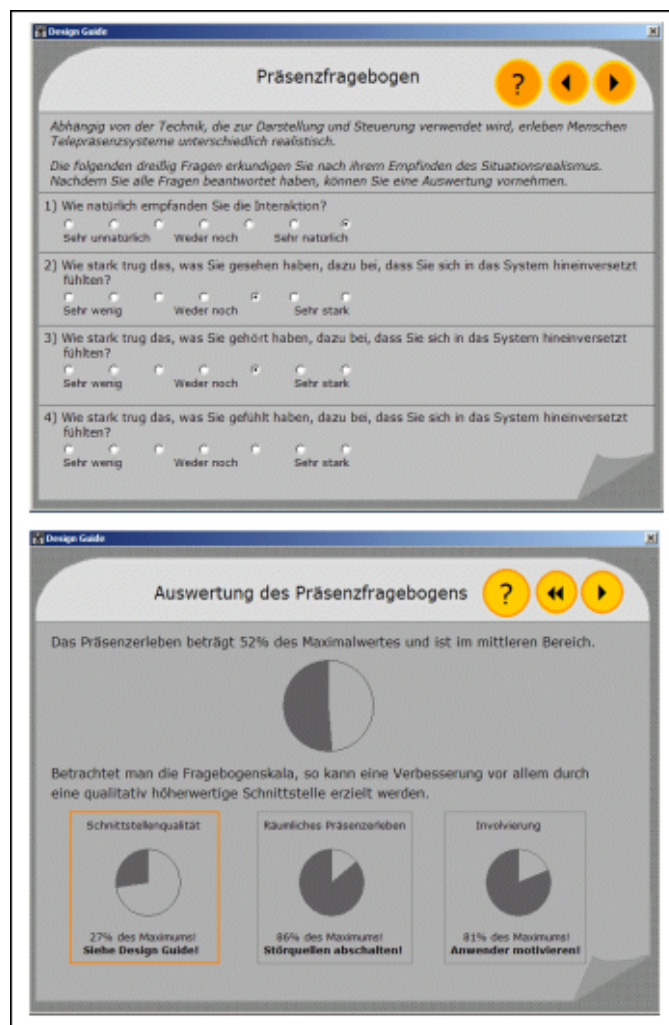


Abb. 31: *PRESENCE* – Design Guide: Das Präsenzerleben des Endanwenders wird mit Hilfe eines Fragebogens erfasst (oben). Durch die computergestützte Erhebung kann eine automatische Auswertung vorgenommen werden (unten).

Im Gegensatz zum ‚Präsenzfragebogen‘ bezieht sich der zweite Fragebogen, der ‚*Design Guide*‘, auf eine sehr frühe Phase im Entwicklungsprozess, in der noch keine Benutzerschnittstelle vorliegt (Abb. 32).

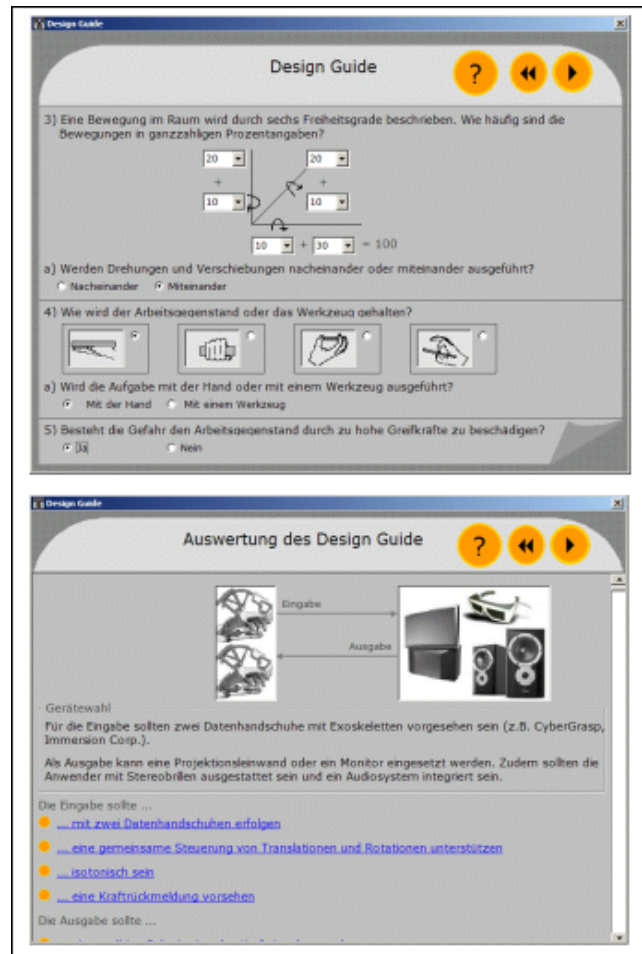


Abb. 32: *PRESENCE* – Design Guide: Der Systementwickler wird durch eine Aufgabenanalyse geführt (oben) und erhält dann konkrete Handlungsempfehlungen zur Schnittstellengestaltung (unten).

Das Verfahren wendet sich direkt an den Systementwickler und führt durch eine Aufgabenanalyse der geplanten Zielanwendung. Neben einem Hilfesystem sind auch ‚Hyperlinks‘ integriert, um bei Bedarf weiterführende Erklärungen bereitzustellen. So wird zum Beispiel erläutert, was unter einer ‚Point-and-Click‘ oder einer ‚Peg-Insertion‘ Aufgabe zu verstehen ist. Anschließend kann auch hier eine automatische Auswertung vorgenommen werden. Dabei werden aus einer Auswahl derzeit geläufiger Ein- und Ausgabegeräte (S. 11ff) die für die Zielanwendung passenden empfohlen. Zudem werden allgemeingültigere, geräteunabhängige Gestaltungsaussagen formuliert. Auch diese sind als aktive ‚Hyperlinks‘ gestaltet, so dass ausführlichere Erläuterungen abgerufen werden können. Das System stellt zudem eine Bibliotheksfunktion bereit und bietet direkten Zugriff auf relevante Literaturstellen, die in elektronischer Form integriert sind.

2 PRESENCE – Design Guide

Die beiden Kernthemen des ‚Design Guide‘, die Aufgabenanalyse und die Ableitung von Gestaltungsrichtlinien, lassen sich am besten anhand von Fallbeispielen demonstrieren. Um die Vielfältigkeit von Telepräsenzsystemen zu unterstreichen, wurden zwei sehr unterschiedliche, aber repräsentative Anwendungsfelder ausgewählt:

Fallbeispiel – Weltraummontage

Im Rahmen einer Weltraummission ist ein Satellit von einer Bodenstation aus telepräsent zu warten, wobei ein Feld beschädigter Solarzellen durch ein neues intaktes auszutauschen ist. Die Aufgabe ist sowohl durch ‚Pick-and-Place‘ als auch durch ‚Peg-Insertion‘ Handlungen gekennzeichnet und erfordert allem translatorische, aber auch rotatorische Bewegungen um alle drei Raumachsen. Die Solarzellen werden entweder positioniert oder gedreht; gleichzeitige Translations-Rotationsbewegungen sind aufgrund der Größe des Arbeitsgegenstandes vernachlässigbar selten. Da Materialbeschädigungen sehr hohe Kosten verursachen würden, wird der Telemanipulator das Feld mit den Solarzellen in einem stabilen Kraftgriff führen. Würde man die Aufgabe terrestrisch durchführen, so könnten die auftretenden Kräfte als durchgängig hoch und die gefühlten Oberflächentexturen als homogen bezeichnet werden. Um die Szene zu visualisieren, sind Kameras am Telemanipulator angebracht. Eine freie Wahl der Betrachtungsposition ist aufgrund der stationären Kamerapositionen allerdings nur eingeschränkt möglich, so dass der große Arbeitsraum nicht jederzeit gut einsehbar ist. Wenngleich eine gute Bildqualität gewährleistet werden kann, sind hohe Verzögerungen zu erwarten, die nur für kurze Zeit, bei einer geeigneten Umlaufposition des Satelliten, minimiert werden können. Der Operateur muss deshalb sowohl zügig als auch genau arbeiten. Obwohl die Montage ausschließlich von Experten durchgeführt wird und die einzelnen Arbeitsschritte mehrfach im Simulator trainiert worden sind, muss sowohl die mentale als auch die motorische Belastung als hoch bezeichnet werden. Kritische Ereignisse, die besonders schnelle Reaktionen erfordern würden, sind aber auszuschließen.

Fallbeispiel – Virtuelle Expositionstherapie

Mit arachnophobischen Patienten soll ein virtuelles Verhaltenstraining durchgeführt werden, wobei als Abschluss der Expositionstherapie eine Exploration des angstauslösenden Stimulus vorgesehen ist. Die virtuelle Spinne wird dabei nicht gegriffen, sondern lediglich mit der flachen Hand durch streichende Bewegungen entlang der Horizontalen und der Tiefendimension berührt; Drehbewegungen sind nicht erforderlich. Obwohl der Arbeitsraum sehr klein ist, weist die haptische Stimulation einen großen Wertebereich auf. Neben sehr harten und weichen Kontakten unterscheiden sich die gefühlten Oberflächentexturen des organischen Reizes. Ziel ist es, dass der Patient den Stimulus räumlich erkundet und lernt, mit ihm umzugehen. Die Anwendung wird umso erfolgreicher sein, je höher das Präsenzerleben des Patienten ist. Die Exposition wird als sehr belastend erlebt, erfordert aber weder schnelle Reaktionen noch besondere motorische Fähigkeiten oder Erfahrung im Umgang mit virtuellen Umgebungen. Technische Restriktionen, wie eine geringe Bildqualität oder lange Systemantwortzeiten, sind auszuschließen.

2.1 Aufgabenanalyse

Die Aufgabenanalyse erfasst die Aspekte, die für die Gestaltung von Telepräsenzsystemen als relevant erarbeitet worden sind (S. 29ff). Die Fragen beziehen sich auf drei Themenbereiche, nämlich auf die Beschreibung der Tätigkeit, die Charakterisierung eines repräsentativen Anwenders und die zu erwartende Darstellungsqualität des Telepräsenzsystems. Da das System zum Zeitpunkt der Erhebung noch nicht vorliegen muss, werden diesbezüglich wenige Fragen gestellt und demgegenüber die Tätigkeitsbeschreibung wesentlich umfassender bearbeitet. Für das Fallbeispiel der Weltraummontage würde sich die Aufgabenanalyse folgendermaßen gestalten (Abb. 33):

Beschreiben Sie bitte die auszuführende Tätigkeit:

1) Handelt es sich um eine Teleoperation oder um eine Simulation?
 Teleoperation *Simulation*





2) Um welche Aufgabe handelt es sich?
 Training *Produktentwicklung* *Montage* *Medizin*

3) Eine Aufgabe besteht aus verschiedenen Handlungen. Wie häufig sind die folgenden Aufgabenelemente in ganzzahligen Prozentangaben?
 0 + 30 + 70 + 0 + 0 = 100%
Point-and-Click *Pick-and-Place* *Peg-Insertion* *Tracking* *Exploration*

4) Eine Bewegung im Raum wird durch sechs Freiheitsgrade beschrieben. Wie häufig sind die Bewegungen in ganzzahligen Prozentangaben

<i>X-Translation</i>	<u> 25 </u> %
<i>X-Rotation</i>	<u> 8 </u> %
<i>Y-Translation</i>	<u> 17 </u> %
<i>Y-Rotation</i>	<u> 12 </u> %
<i>Z-Translation</i>	<u> 28 </u> %
<i>Z-Rotation</i>	<u> 10 </u> %
	<hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/> + 100%

5) Werden Drehungen und Verschiebungen nacheinander oder miteinander ausgeführt?
 nacheinander *miteinander*

6) Wie wird der Arbeitsgegenstand oder das Werkzeug gehalten?
    

7) Wird die Aufgabe mit der Hand oder mit einem Werkzeug ausgeführt?
 mit der Hand *mit einem Werkzeug*

- 8) Besteht die Gefahr, den Arbeitsgegenstand durch zu hohe Greifkräfte zu beschädigen?
 ja Nein
- 9) Ist es wichtig, sowohl sehr leichte als auch sehr schwere Gegenstände darzustellen?
 ja nein, alle Gegenstände sind ungefähr gleich schwer
- 10) Ist es wichtig, sowohl sehr weiche als auch sehr harte Kontakte darzustellen?
 ja nein, alle Kontakte sind ungefähr gleich hart
- 11) Unterscheiden sich die darzustellenden Oberflächentexturen?
 ja nein, alle Oberflächen sind ungefähr gleich rau
- 12) Liegen Verdeckungsprobleme vor?
 ja nein, der Arbeitsraum ist an allen Stellen gut einsehbar
- 13) Wird ein großer Arbeitsraum abgedeckt, so dass die Eingabe oft nachgesetzt werden muss?
 ja nein
- Bitte denken Sie nun an einen repräsentativen Anwender:**
- 14) Kann eine Veränderung eintreten, die der Anwender als stressreich empfindet?
 ja nein
- 15) Kann eine Veränderung eintreten, auf die man besonders schnell reagieren muss?
 ja nein
- 16) Ist die Aufgabe als motorisch anspruchsvoll oder als leicht einzustufen?
 anspruchsvoll leicht
- 17) Handelt es sich um erfahrene oder um unerfahrene Anwender?
 erfahren unerfahren
- 18) Steht die Aufgabenausführung oder das Lernen der Anwender im Vordergrund?
 Lernen Aufgabenausführung
Wenn Lernen
- 19) Soll die Anwendung räumliches oder motorisches Lernen unterstützen (auch beides möglich)?
 räumlich motorisch
- Die verbleibenden Fragen beziehen sich auf das Telepräsenzsystem:**
- 20) Ist eine geringe Bildrate zu erwarten?
 Ja nein
- 21) Sind lange Systemantwortzeiten oder Verzögerungen zu erwarten?
 ja nein
- 22) Ordnen Sie bitte die Gestaltungsziele von 1 (Wichtigsten) bis 3 (Unwichtigsten):
 3 1 1
 a) Präsenzepfinden b) Bearbeitungszeit c) Genauigkeit

Abb. 33: Aufgabenanalyse des ‚PRESENCE – Design Guide‘

2.2 Gestaltungsrichtlinien

Nachdem die Aufgabe vollständig analysiert ist, erfolgt die Auswertung (Abb. 34). Dabei wird zunächst, ausgehend von den derzeit verfügbaren Ein- und Ausgabegeräten, eine Empfehlung über die Gerätewahl (1) ausgesprochen. Diese zusammenfassende Aussage (2) wird anschließend spezifiziert, wie sich anhand der beiden Fallbeispiele exemplarisch illustrieren lässt:

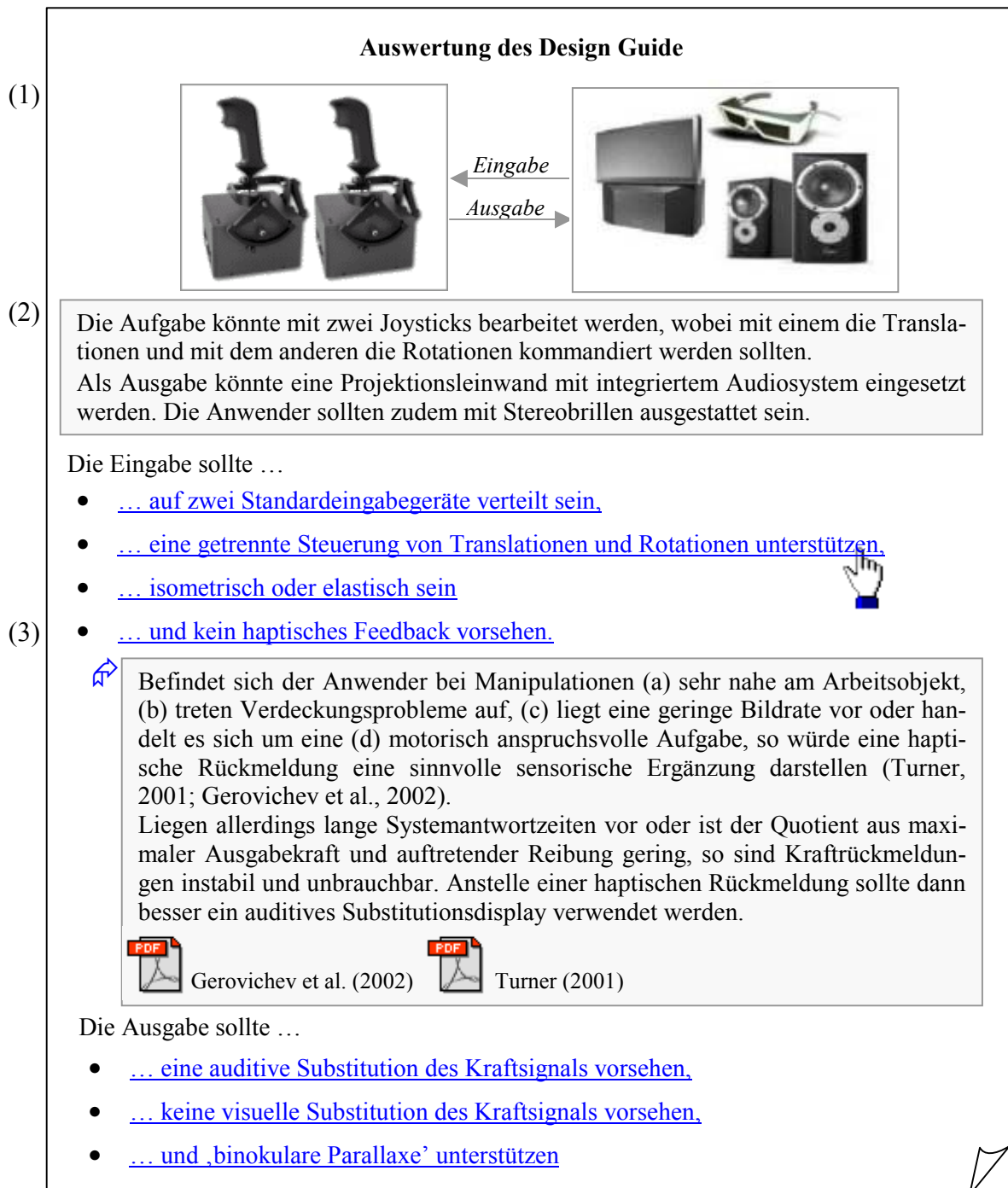


Abb. 34a: Gestaltungsrichtlinien des ‚PRESENCE – Design Guide‘ für das Fallbeispiel der Weltraummontage.

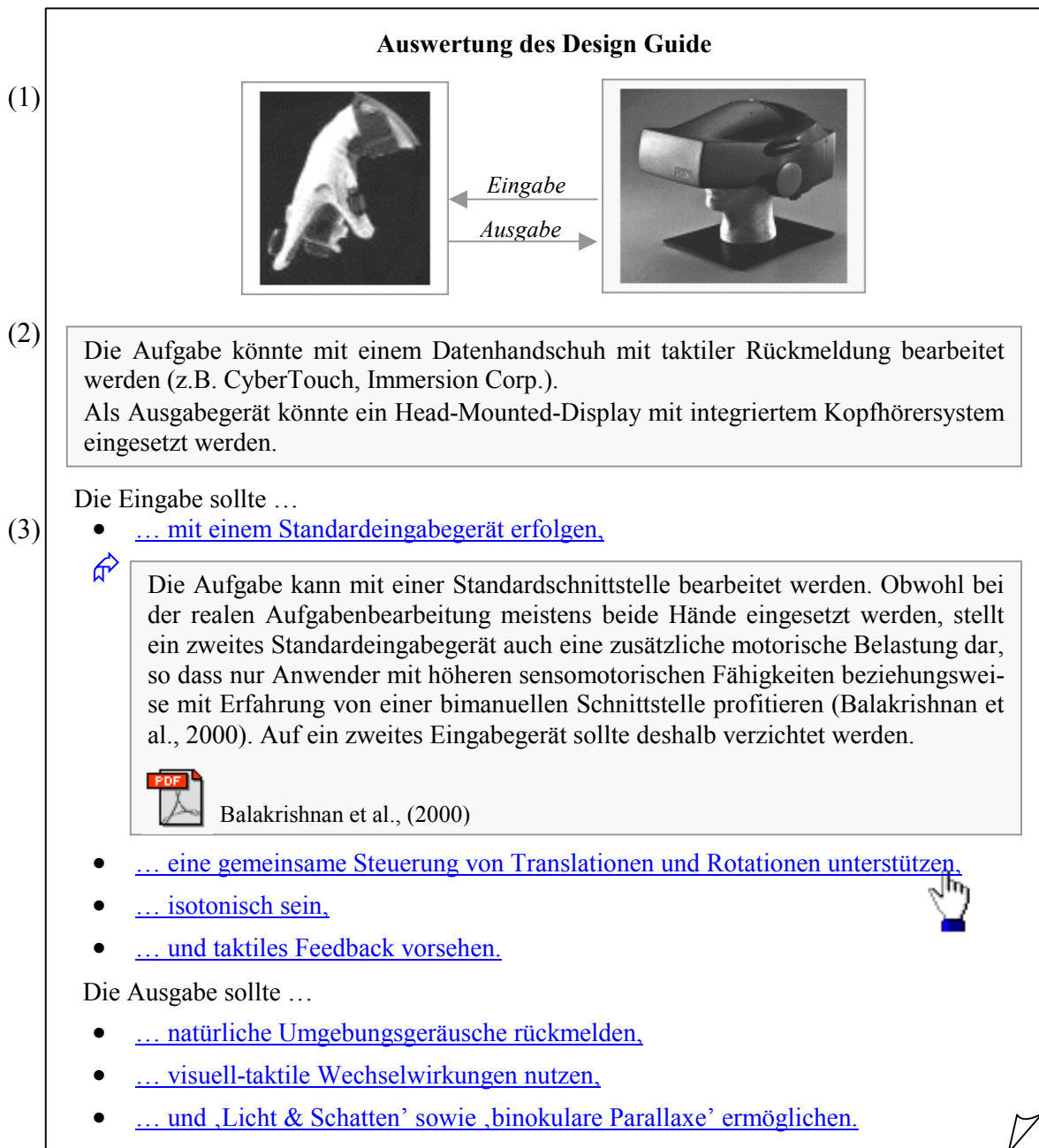


Abb. 34b: Gestaltungsrichtlinien des ‚PRESENCE – Design Guide‘ für das Fallbeispiel der virtuellen Expositionstherapie: Nach einer Visualisierung (1) und einer zusammenfassenden Beschreibung (2) der Gerätewahl, folgen allgemeingültigere, geräteunabhängige Gestaltungsaussagen. Diese sind als ‚Hyperlinks‘ gestaltet, so dass genauere Erläuterungen und weiterführende Literaturstellen (3) abrufbar sind.

Um neben der konkreten Ausprägung der Benutzerschnittstelle auch allgemeingültigere Erläuterungen bereitzustellen, wird die Gestaltung des Eingabeelementes, die Anforderung an die Bewegungskoordination und den Steuerungswiderstand sowie die Relevanz einer haptischen Rückmeldung konkretisiert. Ebenso wird auch die akustische und optische Displaygestaltung diskutiert und zum Beispiel geeignete Möglichkeiten der Augmentierung oder der Umsetzung entsprechender visueller Tiefenindikatoren aufgezeigt.

Wesentlich ist, dass alle Gestaltungsempfehlungen als ‚Hyperlinks‘ gestaltet sind, so dass der Anwender jederzeit weiterführende Informationen und Literaturstellen abrufen kann (3).

2.3 Bewertung des Evaluationssystems

Das vorgestellte Evaluationssystem integriert die Ergebnisse der Literaturrecherche und der empirischen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden sind. Dadurch erlaubt das Verfahren eine Bewertung bereits bestehender Telepräsenzsysteme hinsichtlich des Präsenzerlebens sowie die zielgerichtete Gestaltung neuer Benutzerschnittstellen.

Das Bewertungsinstrument erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und wurde modular erweiterbar konzipiert. Eine sinnvolle Ergänzung könnte zum Beispiel darin bestehen, neben dem Präsenzerleben auch Performanzindikatoren auf die Bewertung bereits bestehender Systeme anzuwenden. Ebenso könnten weitere Anwendungsfelder beziehungsweise weiterführende Gestaltungsaspekte berücksichtigt werden. Neben differential- und allgemeinspsychologischen Aspekten könnten zum Beispiel auch sozialpsychologische Aspekte betrachtet werden: Die derzeit verfügbaren Gestaltungsrichtlinien beziehen sich ausschließlich auf Telearbeitsplätze, die für einen Benutzer ausgerichtet sind; Telearbeitsplätze, die eine Kooperation mehrerer Anwender erfordern, wurden bislang ausgeblendet.

Obwohl alle Gestaltungsrichtlinien empirisch beziehungsweise mit Literaturstellen belegt sind, erscheint eine empirische Validierung des Verfahrens sinnvoll. Ein möglicher Ansatz könnte darin bestehen, eine Benutzerschnittstelle zunächst ohne Konsultation des Evaluationssystems zu realisieren und schließlich eine weitere Schnittstelle entsprechend der Gestaltungsrichtlinien zu entwickeln. Ein experimenteller Vergleich kann dann den Nutzen des ‚*PRESENCE* – Design Guide‘ abschließend beurteilen.

VI Ausblick

I. Mit Montage- und Operationsrobotern sowie den Bereichen der virtuellen Produktentwicklung und dem virtuellen Training wurden repräsentative Anwendungsfelder von Telepräsenzsystemen aufgezeigt und ausgewählte Aspekte empirisch untersucht. Da die Telepräsenztechnologie sehr vielfältig einsetzbar ist, erhebt diese Arbeit keinen Anspruch auf Vollständigkeit und einige Szenarien, wie zum Beispiel die *telepräsenste Kampfmittelbeseitigung*, wurden ausgeblendet (Petzold, Kron, Deml et al., 2004). Darüber hinaus wurde mit der Fokussierung auf Expertenarbeitsplätze eine Schwerpunktbildung vorgenommen. Einen interessanten Gegenstand weiterführender Untersuchungen stellen sicherlich Telepräsenzsysteme dar, die für eine breitere Anwendergruppe erschwinglich sind. Die besondere Herausforderung dürfte dann darin bestehen, auch mit *aufwandsoptimierten Systemkomponenten* und handelsüblichen Geräten ein hohes Präsenzerleben der Anwender zu erzielen.

II. Derzeit geläufige, kommerziell verfügbare Ein- und Ausgabegeräte wurden vorgestellt, wobei vor allem die Funktionsweise kraftrückkoppelnder und taktiler Displays herausgearbeitet wurde. Neben der haptischen Stimulation stellt insbesondere auch die *Propriozeption* einen innovativen Forschungsgegenstand dar (Popp, Gouy et al., 2004). Diese Eingabegeräte ermöglichen einem Anwender, sich bei der Eingabe zu bewegen und so zum Beispiel wirklichkeitsnah einen mobilen Telemanipulator zu kommandieren.

III. Bedingt durch die Betrachtung von Einzelarbeitsplätzen zielt diese Arbeit darauf ab, die individuelle Performanz sowie das individuelle Präsenzerleben zu optimieren. Erweitert man den Fokus auf Telepräsenzsysteme, in denen mehrere Anwender kooperieren, so dürfte neben der Gruppenleistung auch das *Co-Präsenzerleben* ein weiteres wichtiges Gestaltungskriterium darstellen. Bislang liegen nur wenige Untersuchungen dazu vor, wie mehrere Anwender in einem Telepräsenzsystem zu repräsentieren sind, damit der Erwerb eines gemeinsamen Situationsmodells bestmöglich gelingt (Blake et al., 2000).

IV. Weiterhin sind die Untersuchungen zu differential- und allgemeinspsychologischen Gestaltungsaspekten um kognitive Aspekte zu erweitern, wie stellvertretend anhand folgender Fragestellung aufgezeigt wird: Mit den hier verwendeten optischen Displays

wurden entweder reale Kamerabilder oder virtuelle Darstellungen präsentiert. Daneben gibt es auch ‚hybride Displays‘, bei denen abhängig von der Betrachtungsposition entweder ein reales Kamerabild oder ein photorealisiertes, virtuelles Bild gezeigt wird. Diese Darstellungsform wird auch als ‚*mixed reality*‘ bezeichnet (Strauss et al., 1999). Da synthetische Ansichten generell mit einem gewissen Darstellungsrisiko behaftet sind, muss der Anwender zum einen jederzeit wissen, welche Ansicht er wahrnimmt. Zum anderen gilt es, das Präsenzerleben des Betrachters durch den Wechsel zwischen beiden Darstellungsformen möglichst wenig zu beeinträchtigen. Bislang ist weitgehend unklar, welche Übergangsstrategie zu wählen ist, um den beiden entgegengesetzten Gestaltungszielen am ehesten gerecht zu werden.

V. Wie die obigen Ausführungen zeigen, steht die Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle in Telepräsenzsystemen erst am Anfang und viele Fragen sind derzeit noch unbeantwortet. Der ‚PRESENCE – Design Guide‘ kann, neben dem ‚Präsenzfragebogen‘ und dem ‚Design Guide‘, um weitere Verfahren modular erweitert werden. Einen konkreten Handlungsbedarf demonstriert das folgende Beispiel: Die Güte einer Telepräsenzverbindung ist durch ihre Stabilität und ihre Transparenz gekennzeichnet. Eine Heuristik, mit welcher Regelungsstrategie und welcher Parametrierung die subjektiv empfundene Transparenz unter bestimmten technischen Gegebenheiten (z.B. Übertragungstotzeit) optimierbar ist, fehlt bislang. Um ein systematisches Entwurfskriterium für die Entwicklung von Telepräsenz Anwendungen darzustellen, wird ein Transparenzmaß benötigt, das auf psychometrischen Methoden basiert und eine objektive Bewertung der regelungstechnischen Ansätze erlaubt.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vorgehen und Gliederung.....	5
Abb. 2: Räumliche Entkopplung von ‚Master‘ und ‚Slave‘ in Telepräsenzsystemen.....	6
Abb. 3: Operation Lindbergh.....	9
Abb. 4: Aufgabenelemente in Telepräsenzsystemen.....	13
Abb. 5: Passive Eingabegeräte.....	15
Abb. 6: Kraftrückmeldende Systeme.....	16
Abb. 7: Taktile Systeme.....	18
Abb. 8: Optische Ausgabegeräte	20
Abb. 9: Virtuelle Realität.....	24
Abb. 10: Telepräsenzmodell (nach Steuer, 1995).....	28
Abb. 11: Wiener Testsystem.....	34
Abb. 12: Differentialpsychologische Aspekte in Telepräsenzsystemen.....	38
Abb. 13: Bewegungsdimensionen	41
Abb. 14: Klassifikation der Eingabe.....	44
Abb. 15: Motorisches Experiment	51
Abb. 16: Bewegungskoordination	52
Abb. 17: Montagepfad	54
Abb. 18: Bewegungseffizienz.....	55
Abb. 19: Transferfunktionen.....	60
Abb. 20: Sensomotorisches Experiment.....	68
Abb. 21: Sensomotorische Moderatorvariablen	72
Abb. 22: Sensorische Ergänzung	81
Abb. 23: Sensorische Substitution.....	85
Abb. 24: Sensorisches Experiment	89

Abb. 25: Kraftfeedback beim robotergestützten Eingriff.....	90
Abb. 26: Experimentalszenario.....	91
Abb. 27: Manuelle versus robotergestützte Eingriffe.....	92
Abb. 28: Kraftskalierung	93
Abb. 29: Bewegungsmuster.....	95
Abb. 30: <i>PRESENCE</i> – Design Guide	102
Abb. 31: <i>PRESENCE</i> : Präsenzerleben	103
Abb. 32: <i>PRESENCE</i> : Design Guide	104
Abb. 33: Aufgabenanalyse des ‚ <i>PRESENCE</i> – Design Guide‘	107
Abb. 34: Gestaltungsrichtlinien des ‚ <i>PRESENCE</i> – Design Guide‘	108
Abb. 35: Bestimmung des Rotationsfehlers über den Rotationsvektor Φ_i	148

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Visuelle Tiefenindikatoren.....	46
Tab. 2: Bewegungskoordination.....	53
Tab. 3: Bewegungseffizienz	54
Tab. 4: Klassifikation der Eingabe	61
Tab. 5: Teilnutzen der Eingabegeräte (Gesamtstichprobe)	70
Tab. 6: Teilnutzen der Eingabegeräte (Teilstichproben)	71
Tab. 7: Symmetrische Gerätekombination	73
Tab. 8: Haptisches Feedback bei Telemanipulationen	78
Tab. 9: Erfahrung als Moderatorvariable.....	95
Tab. 10: Berechnung der Bewegungskoordination.....	149

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	<u>A</u> nalysis of <u>V</u> ariance
BOOM	<u>B</u> inocular <u>O</u> mnio <u>O</u> riented <u>M</u> onitor
CAVE	<u>C</u> ave <u>A</u> utomatic <u>V</u> irtual <u>E</u> nvironment
DOF	<u>D</u> egrees of <u>F</u> reedom
FOV	<u>F</u> ield of <u>V</u> iew
HMD	<u>H</u> ead <u>M</u> ounted <u>D</u> isplay
HRTFs	<u>H</u> ead <u>R</u> elated <u>T</u> ransfer <u>F</u> unctions
ID	<u>I</u> ndex of <u>D</u> ifficulty
ITQ	<u>I</u> mmersive <u>T</u> endencies <u>Q</u> uestionnaire
JND	<u>J</u> ust <u>N</u> oticeable <u>D</u> ifference
MAUVE	<u>M</u> ulticriteria <u>A</u> ssessment of <u>U</u> sability for <u>V</u> irtual <u>E</u> nvironments
MQF	<u>M</u> ittlerer <u>q</u> uadratischer <u>F</u> ehler
PHANToM	<u>P</u> ersonal <u>H</u> aptic <u>I</u> nterface <u>M</u> echanism
SMK	<u>S</u> ensomotorische <u>K</u> oordination
SOP	<u>S</u> uccessive <u>O</u> rganization of <u>P</u> erception
STOT	<u>S</u> imultaneous <u>T</u> ime- <u>o</u> n- <u>T</u> arget
TOT	<u>T</u> ime- <u>o</u> n- <u>T</u> arget
VEPAB	<u>V</u> irtual <u>E</u> nvironment <u>P</u> erformance <u>A</u> ssessment <u>B</u> attery
VR	<u>V</u> irtuelle <u>R</u> ealität
VRET	<u>V</u> irtual <u>R</u> eality <u>E</u> xposure <u>T</u> herapy
VRMAT	<u>V</u> irtual <u>R</u> eality <u>M</u> anipulation <u>A</u> ssessment <u>T</u> estbed
WIMP	<u>W</u> indows, <u>I</u> cons, <u>M</u> enues, <u>P</u> ointers
WYSIWYF	<u>W</u> hat <u>Y</u> ou <u>S</u> ee, <u>I</u> s <u>W</u> hat <u>Y</u> ou <u>F</u> eel
WYSIWYG	<u>W</u> hat <u>Y</u> ou <u>S</u> ee, <u>I</u> s <u>W</u> hat <u>Y</u> ou <u>G</u> et
ZBA	<u>Z</u> eit- und <u>B</u> ewegungsantizipation

Literaturverzeichnis

3Dconnexion, a Logitech Company. Available at: <http://www.3dconnexion.com/> [1.06.2004].

Adams, R. J., Klowden, D. & Hannaford, B. (2001). Virtual Training for Manual Assembly Task. *Haptics-e*, 2 (2). Available at: http://www.haptics-e.org/Vol_02/ [1.06.2004].

Addelman, S. (1962). Orthogonal Main-Effect Plans for Factorial Experiments. *Technometrics*, 4 (1), 21-46.

Akamatsu, M. (1992). The influence of combined visual and tactile information on finger and eye movements during shape tracing. *Ergonomics*, 35 (5/6), 647-660.

Akamatsu, M., MacKenzie, I. S. & Hasbrouq, T. (1995). A comparison of tactile, auditory, and visual feedback in a pointing task using a mouse-type device. *Ergonomics*, 38 (4), 816-827.

Altmann, S. (1986). *Rotations, quaternions, and double groups*. Oxford: Clarendon Press.

Athenes, S. (1984). *Adaptabilité et développement de la posture manuelle dans l'écriture: Etude comparative du droitier et du gaucher*. Université D'Aix-Marseille II, France.

Atkins, J. E., Fiser, J. & Jacobs, R. A. (2001). Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, 41 (4), 449-461.

Azuma, R., Lee, J. W., Jing, B., Park, J., You, S. & Neumann, U. (1999). Tracking in unprepared environments for augmented reality systems. *Computers and Graphics*, 23 (6), 787-793.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2000): *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung* (9. Aufl.). Berlin: Springer.

Balakrishnan, R. & Kurtenbach, G. (1999). Exploring bimanual camera control and object manipulation in 3D graphics interfaces. *CHI 1999: Conference on Human Factors in Computing Systems, Pittsburgh, PA, May 15-20*, 53-63.

Balakrishnan, R. & Hinckley, K. (2000). Symmetric Bimanual Interaction. *CHI 2000: Conference on Human Factors in Computing Systems, The Hague, The Netherlands April 1-6*, 33-40.

Barfield, W. & Weghorst, S. (1993). The Sense of Presence Within Virtual Environments: A Conceptual Framework. In G. Salvendy & M. Smith (Eds.), *Human-Computer Interaction: Software and Hardware Interfaces* (pp. 699-704). Amsterdam: Elsevier.

- Barfield, W., Sheridan, T. B., Zeltzer, D. & Slater, M. (1995). Presence and performance within virtual environments. In W. Barfield & T. Furness (Eds), *Virtual Environments and Advanced Interface Design* (pp. 473-513). Oxford: Oxford University Press.
- Basdogan, C. & Srinivasan, M. A. (2002). Haptic Rendering in Virtual Environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*. (pp. 117-134). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Bejczy, A. K., Venema, S. & Kim, W. S. (1990). Role of computer graphics in space telerobotics: preview and predictive displays. *SPIE Cooperative Intelligent Robotics in Space, 1387*, 365-377.
- Bejczy, A. K. (2002). Teleoperation, Telerobotics. In O. D. Nwokah & Y. Hurmuzlu (Eds.), *The mechanical systems design handbook: modeling, measurement, and control*. (pp. 685-706). Boca Raton: CRC Press.
- Bérard, F. (1999). The Perceptual Window: Head Motion as a new Input Stream. *INTERACT 1999: Conference on Human-Computer Interaction, Edinburgh, Scotland, 30. August – 3. September*, 238-244.
- Bergamasco, M., Alessi, A. A. & Calcara, M. (1997). Thermal Feedback in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6 (6), 617-629.
- Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon.
- Bier, E. A., Stone, M., Buxton, W. & DeRose, T. D. (1994). Toolglass and Magic Lenses: The See-Through Interface. *Computer Graphics*, 27 (2), 73-80.
- Biggs, J. & Srinivasan, M. A. (2002). Haptic Interfaces. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 93-116). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. (2003). *Biologische Psychologie (5. Aufl.)*. Berlin: Springer.
- Biocca, F., Kim, J., & Choi, Y. (2001). Visual Touch in Virtual Environments: An exploratory study of presence, multimodal interfaces, and cross-modal sensory illusions. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 10 (3), 247-265.
- Bischof, N. (1966). Stellungen-, Spannungs- und Lagewahrnehmung. In W. Metzger & H. Erke (Hrsg.), *Wahrnehmung und Bewußtsein. Handbuch der Psychologie. 1. Band: Allgemeine Psychologie, 1. Halbband* (S. 409-497). Göttingen: Hogrefe.
- Blade, R. & Padgett, M. L. (2002). Virtual Environments: History and Profession. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*. (pp. 1167-1177). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

- Blake, E., Casanueva, J. & Nuñez, D. (2000): Presence as a Means for Understanding User Behaviour in Virtual Environments. *South African Computer Journal*, 26, 247-251.
- Blauert, J. (1997). An Introduction to Binaural Technology. In R. Gilkey & T. Anderson (Eds.), *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments* (pp. 593-609). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Bortz, J. & Döring, N. (2002). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler (3. Aufl.)*. Berlin: Springer.
- Botella, C., Baños, R., Guillén, V., Perpiñá, C., Alcañiz, M. & Pons, A. (2000). Telepsychology: Public speaking fear treatment in internet. *CyberPsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 3 (6), 959-968.
- Bowman, D. A., Gabbard, J. & Hix, D. (2002). A survey of usability evaluation in virtual environments: classification and comparison of methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11 (4), 404-424.
- Bowman, D. A., Johnson, D. B. & Hodges, L. F. (2001). Testbed Evaluation of Virtual Environment Interaction Techniques. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10 (1), 75-95.
- Brooks, F. P. Jr., Ming-Ouh, Y., Batter, J. J. & Kilpatrick, J. P. (1990). Project GROPE. Haptic displays for scientific visualization. *ACM Computer Graphics*, 24 (4), 177-185.
- Bubb, H. & Schmidtke, H. (1981). Systemergonomie. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Lehrbuch der Ergonomie* (S. 263-340). München: Hanser.
- Bullinger, A. H., Roessler, A., & Mueller-Spahn, F. (1998). 3D VR as a tool in cognitive-behavioral therapy of claustrophobic patients. *CyberPsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 1 (2), 139-146.
- Burdea, G. (1996). *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. New York: Wiley.
- Burdea, G. (1999). Haptic Feedback for Virtual Reality. In G. Subsol (Ed.), *Proceedings of the International Workshop on Virtual prototyping* (pp. 87-96). Laval, France.
- Burdea, G. & Coiffet, P. (1999). Virtual Reality and Robotics. In S. Y. Nof (Ed.), *The Handbook of Industrial Robotics (2nd ed.)* (pp. 325-333). New York: Wiley.
- Burdea, G. & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology (2nd ed.)*. New York: Wiley.
- Burdea, G., Langrana, N., Roskos, E., Silver, D. & Zhuang, J. (1992). A portable dexterous master with force-feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1 (1), 18-28.

Buxton, W. (1986). There's More to Interaction Than Meets the Eye: Some Issues in Manual Input. In D. A. Norman & S. W. Draper (Eds.), *User Centered System Design: New Perspectives on Human-computer Interaction* (pp. 319-337). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Buxton, W. & Myers, B. A. (1986). A Study in Two-Handed Input. *CHI 1986: Conference on Human Factors in Computing Systems, Boston, MA, April 13-17*, 321-326.

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.

Campbell, C., Zhai, S., May, K. & Maglio, P (1999). What You Feel Must Be What You See: Adding Tactile Feedback to the Trackpoint, *INTERACT 1999: Conference on Human-Computer Interaction, Edinburgh, Scotland, 30. August – 3. September*, 383-390.

Casiez, G., Plénacoste, P., Chaillou, C. & Semail, B. (2003). Elastic Force Feedback with a New Multi-finger Haptic Device: The DigiHaptic. *EuroHaptics 2003, Dublin, Ireland, July 6-9*, 121-134.

Çavuşoğlu, M. C., Tendick, F., Cohn, M. & Sastry, S. S. (1999). A Laparoscopic Telesurgical Workstation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15 (4), 728-739.

Çavuşoğlu, M. C., Feygin, D. & Tendick, F. (2002). A critical study of the mechanical and electrical properties of the PHANToM haptic interface and improvements for high-performance control. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11 (6), 555 - 568.

Challis, B. P. & Edwards, A. D. (2001). Design Principles for Tactile Interaction. In S. Brewster & R. Smith-Murray (Eds.), *Haptic Human-Computer Interaction* (pp.17-24). Berlin: Springer.

Cheng, L.-T., Kazman, R. & Robinson, J. (1996). Vibrotactile Feedback in Delicate Virtual Reality Operations. *ACM International Conference on Multimedia, Boston, MA, November 18-22*, 243-251.

Cobb, S. Neale, H. & Crosier, J. & Wilson, J. R. (2002). Development and Evaluation of Virtual Environments for Education. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 911-936). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Coble, J. R, North M. M., & North S. M. (1995). Effectiveness of virtual reality environment desensitization in the treatment of agoraphobia. *International Journal of Virtual Reality*, 1 (2), 25-34.

Colonus, H., Diederich, A., Tabeling, S. & Bockhorst, D. (2002): Modeling the Time Course of Visual-Tactile Spatial Interaction. In H. H. Bülthoff et al. (Hrsg.). *Beiträge*

zur 6. Tübinger Wahrnehmungs-konferenz (Abstract, S. 153). Kirchentellinsfurt: Knirsch-Verlag.

Conkar, T., Noyes, J. M. & Kimble, C. (1999). CLIMATE: A framework for developing holistic requirements analysis in virtual environments. *Interacting with Computers*, 11 (4), 387-403.

Cross, C. & Rotkin, L. (1975). The relation between size and apparent heaviness. *Perception and Psychophysics*, 18, 79-87.

Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. & Hart, J. C. (1992). The CAVE audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35 (6), 64-72.

Darken, R. P., Bernatovich, D., Lawson, J. & Peterson, B. (1999). Quantitative Measures of Presence in Virtual Environments: The Role of Attention and Spatial Comprehension. *Cyberpsychology and Behavior*, 2 (4), 337-347.

Davies, R. C. (2002). Applications of Systems Design Using Virtual Environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*. (pp. 1079-1100). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Davis, E. T., Scott, K., Pair, J., Hodges, L. F., & Oliverio, J. (1999). Can Audio Enhance Visual Perception and Performance in a Virtual Environment? *43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, Houston, TX, September 27 – October 1*, 1197-1201.

Deml, B. & Färber, B. (2002). Design haptischer Schnittstellen in der Telerobotik. In E. van der Meer et al. (Hrsg.), *43. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie* (Abstract, S. 334). Lengerich: Papst Science Publishers.

Deml, B. & Färber, B. (2002). Development of a design guide for telepresence-teleaction systems. *5th International Workshop on Presence, Porto, Portugal, October 9-11*, 88-103.

Deml, B. & Färber, B. (2003). Welche sensorische Information fördert Telepräsenzempfinden? In H. H. Bülhoff et al. (Hrsg.). *Beiträge zur 6. Tübinger Wahrnehmungskonferenz* (Abstract, S. 21). Kirchentellinsfurt: Knirsch-Verlag.

Deml, B. & Färber, B. (2003). Mensch-Maschine Schnittstellen in der virtuellen Produktentwicklung. In J. Golz, F. Faul & R. Mausfeld (Hrsg.), *Experimentelle Psychologie: 45. Tagung experimentell arbeitender Psychologen* (Abstract S. 75). Lengerich: Papst Science Publishers.

Deml, B. & Färber, B. (2003). Eingabegeräte in der virtuellen Produktentwicklung. In W. Bungart (Hrsg.). *Psychologie und Wirtschaft leben. 3. Tagung der Fachgruppe Arbeits- und Organisationspsychologie der Deutschen Gesellschaft für Psychologie* (Abstract, S. 41). Mannheim: Universität.

- Deml, B., & Färber, B. (angenommen). Telemanipulation und virtuelle Realität. In B. Zimolong & U. Konradt (Hrsg.). *Enzyklopädie der Psychologie, Serie III, Bd. 2: Ingenieurpsychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Deml, B. & Färber, B. (angenommen). Telemedizin: Vom Handwerk zur Roboterchirurgie. In T. Rammsayer et al. (Hrsg.), *44. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*, Lengerich: Papst Science Publishers.
- Deml, B., Egermeier, H. & Petzold, B. (2003). Are two hands always better than one? – A study on bimanual input control. *3rd International Conference on Humanoid Robots, Karlsruhe / Munich, Germany, October 1-3*, 71-82 (CD-ROM).
- Deml, B., Ortmaier, T. & Weiß, H. (2004). Empirical Comparison of Manual and Robot Assisted Force Feedback Surgery. *EuroHaptics 2004, Munich, Germany, June 5-7*, 403-406.
- Deml, B., Petzold, B. & Egermeier, H. (2004). Beidhändige Interaktion in 3D-Anwendungen. In VDI (Hrsg.). *Useware 2004. Nutzergerechte Gestaltung technischer Systeme, Nr. 1837* (S. 173-181). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Dennerlein, J. T. & Yang, M. (2001). Haptic force-feedback devices for the office computer: Performance and musculoskeletal loading issues. *Human Factors*, *43* (2), 278-286.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Verfügbar unter: <http://www.robotic.dlr.de/mechatronics/lbr/> [1.06.2004].
- Difede, J. & Hoffman, H. G. (2002). Virtual Reality Exposure Therapy for World Trade Center Post-traumatic Stress Disorder: A Case Report, *CyberPsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, *5* (6), 529-535.
- DiFranco, D., Beauregard, G. L. & Srinivasan, M. A. (1997): The Effect of Auditory Cues on the Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments. *6th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, ASME/IMECE*, *61*, 17-22.
- Dinh, H. Q., Walker, N., Song, C., Kobayashi, A. & Hodges, L. F. (1999). Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. *IEEE Virtual Reality, Houston, TX, March 13-17*, 222-228.
- Draper, J. V. (1995). Teleoperators for Advanced Manufacturing: Applications and Human Factors Challenges, *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, *5* (1), 53-58.
- Draper, J. V., Kaber, D. B. & Usher, J. M. (1998). Telepresence. *Human Factors* *40* (3), 354-375.

- Edwards, G. W. (2000). *Performance and Usability of Force Feedback and Auditory Substitutions in a Virtual Environment Manipulation Task*. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Ellis, R. E. & Lederman, S. J. (1998). The “golf-ball” illusion: Evidence for top-down processing in weight perception. *Perception*, 27 (2), 193-202.
- Ellson, D. C. (1947). *The independence of tracking in two and three dimensions with the B-29 pedestal sight*. Aero Medical Laboratory, Memorandum Report TSEAA-694-2G.
- Emmelkamp, P. M., Bruynzeel, M., Drost, L. & van der Mast, C. A. (2001). Virtual Reality Treatment in Acrophobia: A Comparison with Exposure in Vivo. *Cyberpsychology and Behavior*, 4 (3), 335-341.
- Emrich, H. M., Schneider, U. & Zedler, M. (2002). *Welche Farbe hat der Montag? Synästhesie: Das Leben mit verknüpften Sinnen*. Stuttgart: Hirzel-Verlag.
- Engel, F. L., Goossens, P. & Haakma, R. (1994). Improved efficiency through I- and E-feedback: A trackball with contextual force feedback. *International Journal of Human-Computer Studies*, 41 (6), 949-974.
- Engelkamp, J. (1991). *Das menschliche Gedächtnis (2. Aufl.)*. Göttingen: Hogrefe.
- England, R. (1995). Sensory-motor systems in virtual manipulation. In K. Carr & R. England (eds.), *Simulated and Virtual Realities: Elements of perception* (pp. 131-177). London: Taylor & Francis.
- Ernst, M. O. & Banks, M. S. (2002). Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion. *Nature*, 415 (6870), 429-433.
- Eyal, R. & Tendick, F. (2001). Spatial Ability and Learning the Use of an Angled Laparoscope in a Virtual Environment. In J. D. Westwood, H. M. Hoffmann, G. T. Mogel, D. Stredney, R. A. Robb (Eds), *Medicine Meets Virtual Reality* (pp. 146-152). Amsterdam: IOS Press.
- Fakespace Systems, Inc. Available at: <http://www.fakespacesystems.com/> [1.06.2004].
- Färber, B. (1987). Geteilte Aufmerksamkeit. Grundlagen und Anwendung im motorisierten Straßenverkehr. In H. Häcker (Hrsg), *Mensch – Fahrzeug – Umwelt (Bd. 20)*. Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Harterl.
- Ferrell, W. R. (1965). Remote manipulation with transmission delay. *IEEE Transactions of Human Factors in Electronics*, 6 (1), 24-34.
- Ferrell, W. R. & Sheridan, T. B. (1967). Supervisory Control of Remote Manipulation. *IEEE Spectrum*, 4 (10), 81-88.

Fifth Dimension Technologies, Inc. Available at: <http://www.5dt.com/> [1.06.2004].

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.

Fitzmaurice, G. W., Ishii, H. & Buxton, W. (1995). Bricks: Laying the Foundations of Graspable User Interfaces. *CHI 1995: Conference on Human Factors in Computing Systems, Denver, CL, May 7-11*, 442-449.

Fitzmaurice, G. W. & Buxton, W. (1997). An Empirical Evaluation of Graspable User Interfaces: Towards Specialized, Space-Multiplexed Input. *CHI 1997: Conference on Human Factors in Computing Systems, Atlanta, GA, March 22-27*, 43-50.

Flowers, K. (1975). Handedness and Controlled Movement. *British Journal of Psychology*, 66 (1), 39-52.

Fong, T., Conti, F., Grange, S. & Baur, C. (2000). Novel Interfaces for Remote Driving: Gesture, Haptic and PDA. *SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies VII, Boston, MA*, 4195-33.

Foxlin, E. (2002). Motion Tracking Requirements and Technologies. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 163-210). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Freeman, J., Avons, S. E., Pearson, D. E., & IJsselsteijn, W. A. (1999). Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8 (1), 1-13.

Freeman, J., Avons, S., Meddis, R., Pearson, D. & IJsselsteijn, W. (2000): Using behavioral realism to estimate presence. A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9 (2), 149-164.

Gabbard, J. L., Hix, D. & Swan, E. J. (1999). User centered design and evaluation of virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19 (6), 51-59.

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.

Gaschok, J. (2002). Wiener Testsystem. In U. P. Kannig & H. Hollig (Hrsg.), *Handbuch personaldiagnostischer Instrumente* (S. 485-491). Göttingen: Hogrefe.

Gerovichev, O., Marayong, P. & Okamura, A. M. (2002). The Effect of Visual and Haptic Feedback on Manual and Teleoperated Needle Insertion. In T. Dohi & R. Kikinis (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* (pp. 147-154). Berlin: Springer.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. New York: Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (1973). *Die Sinne und der Prozess der Wahrnehmung*. Bern: Huber.

- Gillespie, B., O'Modhrain, S., Tang, P., Pham, C. & Zaretsky, D (1998). The Virtual Teacher. *ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, Anaheim, CA, November 14-19*, 171-178.
- Goldstein, E. B. (2001). *Wahrnehmungspsychologie: Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Guiard, Y. (1986). Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model. *Journal of Motor Behavior*, 19 (4), 486-517.
- Gupta, R., Whitney, D. Zeltzer, D. (1997). Prototyping and Design for Assembly Analysis using Multimodal Virtual Environments, *Computer Aided Design*, 29 (8), 585-597.
- Hajian, A. Z. & Howe, R. D. (2000). Biomechanics of Manipulation: Grasping the Task at Hand. In J. Winters & P. Crago (eds.), *Neural Control of Posture and Movement* (pp. 382-389). Berlin: Springer.
- Hannaford, B., Wood, L., McAfee, D. A. & Zak, H. (1991). Performance evaluation of a six-axis generalized force reflecting teleoperator. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21 (3), 620-633.
- Harm, D. L. (2002). Motion Sickness Neurophysiology, Psychological Correlates, and Treatment. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 637-661). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Hasser, C., Goldenberg, A., Martin K. & Rosenberg, L. (1998). User performance in a GUI pointing task with a low-cost force-feedback computer mouse. *ASME Dynamic Systems and Control Division, Anaheim, CA, November 15-20*, 151-156.
- Gillespie, B., O'Modhrain, S., Tang, P., Pham, C. & Zaretsky, D (1998). The Virtual Teacher. *ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, Anaheim, CA, November 14-19*, 171-178.
- Heeter, C. (1992). The subjective experience of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1 (2), 262-271.
- Held, R. M., Efstathiou, A. & Green, M. (1966). Adaptation to displaced and delayed visual feedback from the hand. *Journal of Experimental Psychology*, 72, 887-891.
- Heller, M. A. & Schiff, W. (1991). Sensory Phenomena. In M. A. Heller & W. Schiff (eds.), *The Psychology of Touch* (pp. 21-22). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Helmholtz, H. (1866/1962). *Treatise on Physiological Optics (Vol. 2)*. New York: Dover.
- Hendrix, C. & Barfield, W. (1996). Presence within Virtual Environments as a Function of Visual Display Parameters. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4 (3), 274-289.

- Heuer, H. (1997). Strukturelle Randbedingungen der Koordination. In E. Loosch, & M. Tamme (Hrsg.), *Motorik – Struktur und Funktion* (S. 39-52). Hamburg: Czwalina.
- Hill, J. W. & Salisbury, J. K. (1977). *Study to design and develop remote manipulator systems. Annual Report, NASA Contract NAS2-8652*. Menlo Park, California.
- Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D. & Kassell, N. (1998). Two-Handed Virtual Manipulation. *Computer-Human Interaction*, 5 (3), 260-302.
- Hirose, M. (1997). Image-based Virtual World Generation, *IEEE Multimedia*, 4 (1), 27-32.
- Hirzinger, G., Brunner, B., Dietrich, J. & Heindl, J. (1993). Sensor-Based Space Robotics – ROTEX and its Telerobotic Features. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9 (5), 649-663.
- Hirzinger, G. & Gombert, B. (1999). Die SpaceMouse bei der CAD-Arbeit. *F & M Feinwerktechnik Mikrotechnik Mikroelektronik*, 107 (3), 64-65.
- Hirzinger, G., Albu-Schäffer, A., Hähle, M., Schaefer, I. & Sporer, N. (2001). On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots. *ICRA 2001: International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26*, 3356-3363.
- Hirzinger, G., Landzettel, H. & Brunner, B. (2001). MARCO – DLR's task-directed sensor-based teleprogramming system. *Robotics and Machine Perception Newsletter*, 10 (1), 6/10.
- Hodges, L. F. (1992). Tutorial: Time-Multiplexed Stereoscopic Computer Graphics, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12 (2), 20-30.
- Howard, I. P. & Templeton, W. B. (1966). *Human Spatial Orientation*. New York: Wiley.
- Howe, R. D., & Kontarinis, D. A. (1992). Task performance with a dextrous teleoperated hand system. *Telem manipulator Technology*, 1833, 199-207.
- Howe, R. D., Peine, W. J., Kontarinis, D. A. & Son, J. S. (1995). Remote palpation technology for surgical applications. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 14 (3), 318-323.
- Hubona, G. S., Wheeler, P. N., Shirah, G. W. & Brandt, M. (1999). The relative contributions of stereo, lighting, and background scenes in promoting 3D depth visualization. *Computer-Human Interaction*, 6 (3), 214-242.
- Imai, S. & Garner, W. R. (1965). Discriminability and preference for attributes in free and constrained classification, *Journal of Experimental Psychology*, 69 (6), 596-608.
- Imatec elektronische Bildanalysesysteme GmbH. Verfügbar unter: <http://www.imatec-bildanalyse.com/> [1.06.2004].

IJsselsteijn, W. A., de Ridder, H., Freeman, J. & Avons, S. E. (2000). Presence: Concept, determinant and measurement. *Proceedings of SPIE: Human Vision and Electronic Imaging V, San Jose, CA, January 24-27*, 3959-51.

Immersion, Corp. Available at: <http://www.immersion.com/> [1.06.2004].

Insko, B. E. (2003). Measuring Presence: Subjective, Behavioral and Physiological Methods. In G. Riva, F. Davide & W. A. IJsselsteijn (Eds.), *Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments* (pp. 110-119). Amsterdam: IOS Press.

Ishii, M. & Sato, M. (1994). A 3D spatial interface device using tensed strings. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3 (1), 81-86.

Iwata, H. (2003). Haptic Interfaces. In J. A. Jacko & A. Sears, A. (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications* (pp. 206-219). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Jacob, D. (2002). Mikromontage: Kleine Teile – große Aufgaben. *iwb newsletter*, 10 (3), 1-3.

Jacobs, R. A. (2002). What determines visual cue reliability. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 6 (8), 345-351.

Jang, D. P., Ku, J. H., Choi, Y. H., Wiederhold, B. K., Nam, S. W., Kim, I. Y & Kim, S. I. (2002). The Development of Virtual Reality Therapy (VRT) System for the Treatment of Acrophobia and Therapeutic Case. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 6 (3), 213-127.

Johannsen, G. (1993): *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer.

Kabbash, P., MacKenzie, S. & Buxton, W. (1993). Human performance using computer input devices in the preferred and non-preferred hands. *CHI 1993: Conference on Human Factors in Computing Systems, Fort Lauderdale, FL, April 5-10*, 474-481.

Kabbash, P., Buxton, W. & Sellen, A. (1994). Two handed input in a compound task. *CHI 1994: Conference on Human Factors in Computing Systems, Vienna, Austria, April 24-29*, 417-423.

Kaczmarek, K. A. & Bach-y-Rita, P. (1995). Tactile Displays. In W. Barfield & T. Furness (Eds.), *Virtual Environments and Advanced Interface Design* (pp. 349-414). London: Oxford University Press.

Kaczmarek, K. A. & Haase, S. J. (2003). Pattern Identification as a Function of Stimulation Current on a Fingertip-Scanned Electrotactile Display. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11 (3), 269-275.

Kajimoto, H., Kawakami, N., Maedo, T. & Tachi, S. (2001). Electrocutaneous Display with Receptor Selective Stimulations. *Transactions of the Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers*, 84 (1), 120-128.

- Kalawsky, R. S. (1999). VRUSE – a computerised diagnostic tool: for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *Applied Ergonomics*, 30 (1), 11-25.
- Kalawsky, R. S. (2000). The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments. *3rd International Workshop on Presence, Delft, The Netherlands, March 27-28*, available at: <http://www.presence-research.org/Kalawsky.pdf> [1.06.2004].
- Kaur, K., Maiden, N. & Sutcliffe, A. (1999). Interacting with virtual environments: an evaluation of a model of interaction. *Interacting with computers*, 11 (4), 403-426.
- Kennedy, R., Lane, N., Berbaum, K. & Lilienthal, M. (1993). A Simulator Sickness Questionnaire (SSQ): A New Method for Quantifying Simulator Sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3 (3), 203-220.
- Kessler, G. D. (2002). Virtual Environment Models. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 255-276). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Kheddar, A., Chellali, R. & Coiffet, P. (2002). Virtual Environments – Assisted Teleoperation. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 959-997). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Kim, W. S., Tendick, F., Ellis, S. R. & Stark, L. (1987) A comparison of position and rate control with consideration of manipulator system dynamics. *Journal of Robotics and Automation*, 5 (3), 426-436.
- Kim, W. S. (1996). Virtual reality calibration and preview / predictive displays for telerobotics. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5 (2), 173-190.
- Klatzky, R. J., Lederman, S. J. & Matula, D. A. (1993). Haptic Exploration in the Presence of Vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19 (4), 726-743.
- Klatzky, R. J. & Lederman, S. J. (2002). Touch. In A. F. Healy & R. W. Proctor (Eds.), *Experimental Psychology* (pp. 147-176). Volume 4 in I. B. Weiner (Editor-in-Chief) *Handbook of Psychology*. New York: Wiley.
- Kondraske, G. V., Hamilton, E. C., Scott, D. J., Fischer, C. A., Tesfay, S. T., Taneja, R., Brown, R. J. & Jones, D. B. (2002). Surgeon workload and motion efficiency with robot and human laparoscopic camera control, *Surgical Endoscopy*, 16 (11), 1523-1527.
- 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.
- Krendel, E. S. & McRuer, D. T. (1960). A servomechanism approach to skill development. *Journal of the Franklin Institute*, 269 (1), 24-42.

- Kugath, D. A. (1972). *Experiments Evaluating Compliance and Force Feedback Effect on Manipulator Performance*. NASA-CR-128605. General Electric Corporation: Philadelphia.
- Kühnapfel, U., Çakmak, H. K., Maass, H. (2000). Endoscopic surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation. *Computer Graphics*, 24 (5), 671-682.
- Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G. W., Baudel, T. & Buxton, W. (1997). The design of a GUI paradigm based on tablets, two-hands, and transparency. *CHI 1997: Conference on Human Factors in Computing Systems, Atlanta, GA, March 22-27*, 53-63.
- LaMotte, R. H. (1977). Psychophysical and neurophysiological studies of tactile sensibility. In N. Hollies & R. Goldman (Eds.): *Clothing comfort: interaction of thermal, ventilation, construction and assessment factors* (pp. 83-105). Ann Arbor, MI: Science Publishers.
- Lampton, D. R., Knerr, B. W., Goldberg, S. L., Bliss, J. P., Moshell, J. M. & Blau, B. S. (1994). The Virtual Environment Performance Assessment Battery (VEPAB): Development and Evaluation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3 (2), 145-157.
- Lathan, C. E., Tracey, M. R., Sebrechts, M. M., Clawson, D. M. & Higgins, G. A. (2002). Using Virtual Environments as Training Simulators: Measuring Transfer. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 403-414). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Lawson, B. D., Graeber, D. A., Mead, M. A. & Muth, E. R. (2002). Signs and Symptoms of Human Syndromes Associated with Synthetic Experiences. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 589-618). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Lécuyer, A., Burkhardt, J-M., Coquillart, S. & Coiffet, P. (2001). Boundary of Illusion: an Experiment of Sensory Integration with a Pseudo-Haptic System. *IEEE International Conference on Virtual Reality, Yokohama, Japan*, 115-122.
- Lécuyer, A., Megard, C., Burkhardt, J. M., Lim, T., Coquillart, S., Coiffet, P. & Graux, L. (2002). The Effect of Haptic, Visual and Auditory Feedback on an Insertion Task on a 2-Screen Workbench. *Immersive Projection Technology Symposium, Orlando, FL, March 24-25*, available at: <http://www.irisa.fr/siames/GENS/alecuyer/page1.html> [1.06.2004].
- Lederman, S. J. & Klatzky, R. L. (1999). Sensing and displaying spatially distributed fingertip forces in haptic interfaces for teleoperator and virtual environment systems. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 8 (1), 86-103.
- Leganchuk, A., Zhai, S. & Buxton, W. (1998). Manual and cognitive benefits of two-handed input: an experimental study. *Computer-Human Interaction*, 5 (4), 326-359.

- 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.
- Levitin, D. J., MacLean, K., Mathews, M., Chu, L. & Jensen, E. (2000). The Perception of Simultaneity. *American Institute of Physics*, 517 (1), 323-329.
- Lindeman, R. W., Sibert, J. L., Hahn, J. K. (1999). Towards Usable VR: An Empirical Study of User Interfaces for Immersive Virtual Environments. *CHI 1999: Conference on Human Factors in Computing Systems, Pittsburgh, PA, May 15-20*, 64-71.
- Luce, R. & Tukey J. (1964). Simultaneous Conjoint Measurement. *Journal of Mathematical Psychology*, 1 (1), 1-27.
- Luczak, H., Roetting, M. & Oehme, O. (2003). Visual Displays. In J. A. Jacko & A. Sears (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications* (pp. 187-205). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Mania, K. & Chalmers, A. (2001). The Effects of Level of Immersion on Presence and Memory in Virtual Environments: A Reality Centered Approach. *CyberPsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 4 (2), 247-264.
- Marescaux, J., Leroy, J., Gagner, M., Rubino, F., Mutter, D., Vix, M., Butner, S. E. & Smith, M. K. (2001). Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413 (6854), 379-380.
- Marks, L. E., Szczesiul, R. & Ohlott, P. (1986). On the cross-modal perception of intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12 (4), 517-534.
- Maslah, M. R. & 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, The Hague, The Netherlands, April 1-6*, 25-32.
- Massie, T. H. & Salisbury, J. K. (1994). The PHANToM haptic Interface: a device for probing virtual objects. In C. J. Radcliffe (Ed.), *International Mechanical Engineering Exposition and Congress, DSC 55-11* (pp. 295-302). Chicago: ASME.
- Massimino, M. J., Sheridan, T. B. & Roseborough, J. B. (1989). One hand tracking in six degree of freedom. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Boston, MA, November 14-17*, 498-503.
- Massimino, M. J. & Sheridan, T. B. (1993). Sensory substitution for force feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2 (4), 344-352.
- Massimino, M. J. & Sheridan, T. B. (1994). Teleoperator performance with varying force and visual feedback. *Human Factors*, 36 (1), 145-157.

- Meehan, M., Insko, B., Whitton, M. & Brooks, F. P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *ACM Transactions on Graphics*, 21 (3), 645-652.
- Mills, S. & Noyes, J. (1999). Virtual reality: An overview of user-related design issues. *Interacting with Computers*, 11 (4), 375-386.
- Miner, N., Gillespie, B. & Caudell, T. (1996). Examining the Influence of Audio and Visual Stimuli on a Haptic Display. *IMAGE Conference, Phoenix, AZ, June 23-25*, available at: <http://www-personal.engin.umich.edu/~brentg/Publications.html> [1.06.2004].
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *OMNI*, 2 (9), 45-52.
- Monkman, G. J. & Taylor, P. M. (1993). Thermal Tactile Sensing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9 (3), 313-318.
- Morar, S. S., Macredie, R. C. & Cribbin, T. (2002). An Investigation of Visual Cues used to Create and Support Frames of Reference and Visual Search Tasks in Desktop Virtual Environments. *Virtual Reality*, 6 (3), 140-150.
- Moshell, M. J. & Hughes, C. E. (2002). Virtual Environments As a Tool for Academic Learning. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 893-910). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Moy, G., Wagner, C. & Fearing, R. S. (2000). A compliant tactile display for teleaction. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 24-27*, 3409-3415.
- Mücke, S. (2000). Der Einfluß der Aufgabenschwierigkeit auf die leistungs- und beanspruchungsbezogenen Potentiale aktiver Stellteile, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 1, 2-10.
- Murray, C. D., Arnold, P., Thornton, B. (2000). Presence Accompanying Induced Hearing Loss: Implications for Immersive Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9 (2), 137-148.
- Murray, A. M., Klatzky, R. L. & Khosla, P. K. (2003). Psychophysical Characterization and Testbed Validation of a Wearable Vibrotactile Glove for Telemanipulation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12 (2), 156-182 .
- 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.
- Negroponte, N. (1995): *Being digital*. New York: Knopf.
- Neuwirth, W. (2002). *Zeit- und Bewegungsantizipation (Version. 24.00)*. Mödling: Dr. G. Schuhfried GmbH.

- Nielsen, J. (2001). *Usability Engineering*. Boston et al.: Academic Press.
- Norman, D. A. (2002). *The Design of Everyday Things*. New York: Basic Books.
- Okamura, A. M., Hage, M. W., Cutkosky, M. R. & Dennerlein, J. T. (2000). Improving Reality-Based Models for Vibration Feedback. *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division*, 69 (2), 117-1124.
- Oren, T. (1990). Designing a new medium. In B. Laurel (Ed.), *The art of human-computer interface design* (pp. 467-479). Reading: Addison-Wesley.
- Pavani, F., Spence, C. & Driver, J. (2000). Visual capture of touch. Out-of-the-body experiences with rubber gloves. *Psychological Science*, 11 (5), 353-359.
- Payette, J., Hayward, V., Ramstein, C. & Bergeron, D. (1996). Evaluation of a force-feedback (haptic) computer point device in zero gravity. *ASME Dynamic Systems and Control Division, Honolulu, HI, December 10-13*, 547-553.
- Pertaub, D. P., Slater, M. & Barker, C. (2002). An experiment on public speaking anxiety in response to three different types of virtual audience. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11 (1), 68-78.
- Petzold, B., Zaeh, M. F., Färber, B., Deml, B., Egermeier, H., Schilp, J. & Clarke, S. (2004). A Study on Visual, Auditory and Haptic Feedback for Assembly Tasks. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13 (1), 16-21.
- Petzold, B., Kron, A., Deml, B., Zaeh, M. F., Schmidt, G. & Färber, B. (accepted). How to Design a Haptic Telepresence System for the Disposal of Explosive Ordnances. *International IARP Workshop on Robotics and Mechanical assistance in Humanitarian Demining and similar risky situations, Brussel, Belgium, June 16-18*.
- Pijpers, J. R., Bakker, F. C., Oudejans, R. R., & Boschker, M. S. (2001). Anxiety and fluency of movements in climbing. *In the dawn of the new millennium: International Society of Sport Psychology, Skiathos Island, Greece, May 28 – June 2*, 133-135.
- Popescu, G., Burdea, G. & Trefftz, H. (2002). Multimodal Interaction Modelling. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 435-454). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Popp, M. M. & Färber, B. (1997). Simulation of truck acoustics. In K. Brookhuis, D. de Waard & C. Weikert (Eds.), *Simulators and Traffic Psychology* (pp. 83-91). Groningen: Centre for Environmental and Traffic Psychology.
- Popp, M. M., Platzer, E., Eichner, M. & Schade, M. (2004). Walking with and Without Walking: Perception of Distance in Large-Scale Urban Areas in Reality and in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13 (1), 61-76.
- Popp, M. M., Gouy, E. & Holtmannspötter, J. (2004). Real Walking in Virtual Environments. A new Experimental Device. *EuroHaptics 2004, Munich, Germany, June 5-7*, 156-159.

- Poupyrev, I., Weghorst, S., Billingham, M. & Ichikawa, T. (1997). A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive VR. *ACM Symposium on Virtual Reality Software, Lausanne, Switzerland, September 15-17*, 21-28.
- Prieler, J. (2002). *Sensomotorische Koordination (Version 23.00)*. Mödling: Dr. G. Schuhfried GmbH.
- Puhr, U. (2001). *Zweihand Koordination (Version 23.00)*. Mödling: Dr. G. Schuhfried GmbH.
- Raisamo, R. (1999). *Multimodal Human-Computer Interaction: a constructive and empirical study*. Dissertation Thesis. University of Tampere.
- Repperger, D. W., Phillips, C. A. & Chelette, T. L. (1995). A study on spatially induced 'virtual force' with an informatic theoretic investigation of human performance. *IEEE Transactions of Man, Machine, and Cybernetics*, 25 (10), 1392-1404.
- Richard, P. & Coiffet, P. (1995). Human perceptual issues in virtual environments: sensory substitution and information redundancy. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, Tokyo, Japan, July 4-7*, 301-306.
- Röder, B. & Rösler, F. (2001). Vergleich haptischer Wahrnehmungsleistungen zwischen blinden und sehenden Personen. In M. Grunwald & L. Beyer (Hrsg.): *Der bewegte Sinn – Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung* (S. 89-98). Basel: Birkhäuser Verlag.
- Rohling, R. & Hollerbach, J. (1993). Calibrating the Human Hand for Haptic Interfaces. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2 (4), 281-298.
- Rollman, G. B. (1969). Electrocutaneous stimulation: psychometric functions and temporal integration. *Perception and Psychophysics*, 5, 289-293.
- Rosen, J., Hannaford, B., MacFarlane, M. P. & Sinanan, M. N. (1999). Force Controlled and Teleoperated Endoscopic Grasper for Minimally Invasive Surgery – Experimental Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46 (10), 1212-1221.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L. F., Smith, S., Lee, J. H. (2000). A Controlled Study of Virtual Reality Exposure Therapy for the Fear of Flying, *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 68 (6), 1020-1026.
- Sadowski, W. & Stanney, K. M. (2002). Presence in virtual environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 791-806). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Salisbury, J. K. & Srinivasan, M. A. (1997). Phantom-based haptic interaction with virtual objects. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17 (5), 6-10.

- Salnäss, E.-L. (1999). Presence in multi-modal interfaces. *2nd International Workshop on Presence, Essex, Colchester, April 6-7*, available at: <http://www.nada.kth.se/~evalotta/Presence/IWVP.html> [1.06.2004].
- Salnäss, E.-L., Rasmuss-Gröhn, K. & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7 (4), 461-476.
- Salnäss, E.-L. & Zhai, S. (2003). Collaboration meets Fitts' law: passing virtual objects with and without haptic force feedback. *INTERACT 2003: Conference on Human-Computer Interaction, Zurich, Switzerland, September 1-5*, 97-104.
- Sankaranarayanan, G., Weghorst, S., Sanner, M. F., Gillet, A. & Olson, A. (2003). Role of Haptics in Teaching Structural Molecular Biology. *Haptics 2003: Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Los Angeles, CA, March 22-23*, 363-366.
- Satava, R. M. & Jones, S. B. (2002). Medical Applications of Virtual Environments. K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 937-957). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Scharf, B. & Houtsma, A. J. (1986). Audition II: loudness, pitch, localization, aural distortion, pathology. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance: Sensory Processes and Perception (Vol. 1)* (pp. 15.1-60). New York: Wiley.
- Scheuchepflug, R. (2001). Measuring Presence in virtual environments. *CHI 2001: Conference on Human Factors in Computing Systems, Seattle, WA, 31 March – 5 April*, 56-58.
- Schlögl, A., Slater, M. & Pfurtscheller, G. (2002). Presence research and EEG. *5th International Workshop on Presence, Porto, Portugal, October 9-11*, 154-160.
- Schloerb, D. W. (1995). A quantitative measure of telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4 (1), 64-80.
- Schriever, W. (1925). Experimentelle Studien über das stereoskopische Sehen. *Zeitschrift für Psychologie*, 96, 113-170.
- Schubert, T., Friedmann, F. & Regenbrecht, H. (1999). Embodied presence in virtual environments. In R. Paton & I. Neilson (Eds.), *Visual Representations and Interpretation* (pp. 269-278). Berlin: Springer.
- Schubert, T., Friedmann, F. & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: factor analytic insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10 (3), 266-281.
- Schubert, T. & Regenbrecht, H. (2002). Wer hat Angst vor virtueller Realität? Phobie, Therapie und Präsenz in virtuellen Welten. In G. Bente (Hrsg.), *Virtuelle Realitäten* (S. 255-274). Göttingen: Hogrefe.

Senders, J. W., Christensen, J. M., & Sabeh, R. (1955). *Comparison of single operator's performance with team performance in a tracking task (TN-55-362)*. Aero Medical Laboratory, Wright Air Development Center.

SensAble Technologies, Inc. Available at: <http://www.sensable.com/> [1.06.2004].

Shackel, B. (1976). Process Control – Simple and Sophisticated Display Devices as Decision Aids. In T. B. Sheridan & G. Johanssen (Eds.), *Monitoring Behavior and Supervisory Control* (pp. 429-443). New York: Plenum Press.

Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171 (972), 701-703.

Sheridan, T. B. (1992a). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge: 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. (1996). Further musings on the psychophysics of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5 (2), 241-246.

Sheridan, T. B. (2002). *Humans and Automation: System Design and Research Issues*. New York: Wiley.

Sherman, A., Çavuşoğlu, M. C. & Tendick, F. (2000). Comparison of teleoperator control architectures for palpation task. *ASME Dynamic Systems and Control Division*, 2, 1261-1268.

Shewchuk, J. P., Chung, K. H. & Williges, R. C. (2002). Virtual Environments in Manufacturing. In K. M. Stanney (Ed.): *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 1119-1140). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Shilling, R. D. & Shinn-Cunningham, B. (2002). Virtual Auditory Displays. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 65-92). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Shinn-Cunningham, B. G., Lehnert, H., Kramer, G., Wenzel, E. M. & Durlach, N. I. (1997). Auditory Displays. In R. Gilkey & T. Anderson (Eds.), *Binaural and Spatial Hearing in Real and in Virtual Environments* (pp. 611-663). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Singer, M. J., Ehrlich, J. A., Cinq-Mars, S. & Papin, J. P. (1995). *Task performance in virtual environments: Stereoscopic vs. monoscopic displays and head-coupling*. ARI Technical Report 1034. Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.

- Slater, M. & Usoh, M. (1993). Representation Systems, Perceptual Positions, and Presence in Immersive Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2 (3), 221-233.
- 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.
- Slater, M, Steed, A, McCarthy, J. & Maringelli, F. (1998). The Influence of Body Movement on Presence in Virtual Environments. *Human Factors*, 40 (3), 469-477.
- Slater, M. (1999). Measuring presence: a response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8 (5), 560-565.
- Smith, B. A., Ho, J., Ark, W. & Zhai, S. (2000). Hand Eye Coordination Patterns in Target Selection. *ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications, Palm Beach Gardens, FL, November 6-8*, 117-122.
- Snow, M. P. & Williges, R. C. (1998). Empirical models of perceived presence in virtual environments based on free-modulus magnitude estimation. *Human Factors*, 40 (3), 386-402.
- Sonderforschungsbereich 453, Technische Universität München. Verfügbar unter: <http://www.lsr.ei.tum.de/sfb453/index.html> [1.06.2004].
- Soto-Faraco, S. & Kingstone, A. (2001). Multisensory integration of dynamic information. In G. Calvert, C. Spence & B. Stein (Eds.). *Handbook of Multisensory Processes*. MIT Press.
- Srinivasan, M. A., Beauregard, G. L. & Brock, D. (1996). The Impact of Visual Information on the Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments. *ASME Dynamic Systems and Control Division*, 58, 555-559.
- 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. (2003). Virtual Environments. In J. A. Jacko & A. Sears (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications* (pp. 621-634). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Stanney, K. M., Mollaghasemi, M., Reeves, L., Breaux, R. & Graeber, D. A. (2003). Usability engineering of virtual environments (VEs): identifying multiple criteria that drive effective VE system design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58 (4), 447-481.
- 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). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

- Stevens, J. C. (1991). Thermal sensibility. In M. A. Heller & E. Schiff (Eds.), *The Psychology of Touch* (pp. 61-90). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Stevens, S. S. & Harris, J. R. (1962). The Scaling of Subjective Roughness and Smoothness. *Journal of Experimental Psychology*, 64 (5), 489-494.
- Stoakley, R., Conway, M. J. & Pausch, R. (1995). Virtual Reality on a WIM: Interactive Worlds in Miniature. *CHI 1995: Conference on Human Factors in Computing Systems, Denver, Colorado, May 7-11*, 265-272.
- Stone, R. J. (2001). Haptic Feedback: A Brief History from Telepresence to Virtual Reality. In S. A. Brewster & R. Murray-Smith (Eds.). *Haptic Human-Computer Interaction* (pp. 1-16). Berlin: Springer.
- Stone, R. J. (2002). Applications of Virtual Environments: An Overview. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 827-856). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Storms, R. L. (2002). Auditory-Visual Cross-Modality Interaction and Illusions. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 455-469). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Strauss, W., Fleischmann, M., Thomsen, M., Novak, J., Zlender, U., Kulesa, T. & Pragasky, F. (1999). Staging the Space of Mixed Reality – Reconsidering the Concept of a Multi-User Environment. *Symposium on Virtual Reality Modeling Language, Paderborn, Germany, February 23-26*, 79-92.
- Sturman, D. & Zeltzer, D. (1994). A Survey of Glove-based Input. *Computer Graphics and Applications*, 14 (1), 30-39.
- Taylor, M. M. & Lederman, S. J. (1975). Tactile Roughness of Grooved Surface: A Model and the Effect of Friction, *Perception and Psychophysics*, 17 (1), 23-36.
- Taylor, R. H. & Joskowicz, L. (2003). Computer-integrated surgery and medical robotics. In M. Kutz (Ed.), *Standard Handbook of Biomedical Engineering and Design* (pp. 29.3-29.43). New York: McGraw-Hill.
- Tendick, F., Downes, M., Goktekin, T., Çavuşoğlu, M. C., Feygin, D., Wu, X., Eyal, R., Hegarty, M. & Way, L. W. (2000). A Virtual Environment Testbed for Training Laparoscopic Surgical Skills, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9 (3), 236-255.
- Todor, J. I. & Doane, T. (1978). Handedness and hemispheric asymmetry in the control of movements. *Journal of Motor Behavior*, 10, 295-300.
- Todorov, E. & Jordan, M. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, 5 (11), 1226-2002.
- Triesch, J., Ballard, D. H. & Jacobs, R. A. (2002). Fast Temporal Dynamics of Visual Cue Integration. *Perception*, 31 (4), 421-434.

- Tromp, J. G., Steed, A. & Wilson, J. R. (2003). Systematic usability evaluation and design issues for collaborative environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12 (3), 241-267.
- Turner, M. L. (2001). *Programming Dexterous Manipulation by Demonstration*. Dissertation Thesis. Stanford University.
- Unger, B. J., Nicolaidis, A., Thompson, A., Klatzky, R. L., Hollis, R. L., Berkelman, P. J. & Lederman, S. (2002). Virtual Peg-in-Hole Performance Using a 6-DOF Magnetic Levitation Haptic Device: Comparison with Real Forces and with Visual Guidance Alone. *10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando, FL, March 24-25*, 263-270.
- University of Michigan, Virtual Reality Laboratory. Available at: <http://www-vrl.umich.edu/> [1.06.2004].
- Usoh, M., Catena, W., Arman, S. & Slater, M. (2000). Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9 (5), 497-503.
- van Scoy, F., Kawai, T., Darrach, M. & Rash, C. (2001). Haptic Display of Mathematical Functions for Teaching Mathematics to Students with Vision Disabilities. In S. Brewster & R. Smith-Murray (Eds.), *Haptic Human-Computer Interaction* (pp. 31-40). Berlin: Springer.
- Vereijken, B., van Emmerik, R., Whiting, H. & Newell, K. (1992). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 24 (1), 133-142.
- von Hardenberg, C. & Bérard, F. (2001) Bare-Hand Human-Computer Interaction, *ACM Workshop on Perceptive User Interfaces, Orlando, FL, November 15-16*, available at: <http://www.cs.ucsb.edu/conferences/PUI/PUIWorkshop/index.html> [1.06.2004].
- Wagner, C. R., Stylopoulos, N. & Howe, R. (2002). The Role of Force Feedback in Surgery: Analysis of Blunt Dissection. *10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando, FL, March 24-25*, 73-79.
- Wagner, C. R., Lederman, S. J., Howe, R. D. (2002). A Tactile Shape Display Using RC Servomotors. *10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando, FL, March 24-25*, 354-356.
- Wall, S. A. & Harwin, W. S. (2001). Interaction of Visual and Haptic Information in Simulated Environments: Texture Perception. In S. Brewster & R. Smith-Murray (Eds.), *Haptic Human-Computer Interaction* (pp. 108-117). Berlin: Springer.
- Ware, C. & Balakrishnan, R. (1994). Reaching for objects in VR displays: lag and frame rate. *Computer-Human Interaction*, 1 (4), 331-356.
- Ware, C. & Rose, J. (1999). Rotating virtual objects with real handles. *Computer-Human Interaction*, 6 (2), 162-180.

Watson, B. A., Walker, N., Woytiuk, P. & Ribarsky, W. R. (2003). Maintaining usability during 3D placement despite delay. *IEEE Virtual Reality, Los Angeles, CA, March 22-26*, 133-140.

WebSurg, virtual surgical university. Available at: <http://www.websurg.com/> [1.06.2004].

Welch, R. B., Blackmon, T. T., Liu, A., Mellers, B. A. & Stark, L. (1996). The Effect of Pictorial Realism, Delay of Visual Feedback, and Observer Interactivity on the Subjective Sense of Presence in a Virtual Environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5 (3), 263-273.

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.

Wellman, P. & Howe, R. D. (1995). Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. *ASME Dynamics Systems and Control Division, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 57 (2), 713-718.

Wenzel, E. M. (1992). Localization in Virtual Acoustic Displays. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1 (1), 80-107.

Wiederhold, B. K., Gevirtz, R. N. & Spira, J. L. (2001). Virtual Reality Exposure Therapy vs. Imagery Desensitization Therapy in the Treatment of Flying Phobia. In G. Riva & C. Galimberti (Eds.), *Towards CyberPsychology: Mind, Cognitions and Society in the Internet Age*. (pp. 254-272). Amsterdam: IOS Press.

Wiederhold, B. K., Jang, D. P., Kaneda, M., Cabral, I., Lurie, Y., May, T., Kim, I. Y., Wiederhold, M. D. & Kim, S. I. (2001). An Investigation into Physiological Responses in Virtual Environments: An Objective Measurement of Presence. In G. Riva & C. Galimberti (Eds.), *Towards CyberPsychology: Mind, Cognitions and Society in the Internet Age*. (pp. 175-183). Amsterdam: IOS Press.

Willians, J. S. & Harrison, M. D. (2001). A toolset supported approach for designing and testing virtual environment interaction techniques. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55 (2), 145-165.

Wilson, J. R., Eastgate, R. M. & D'Cruz, M. (2002). Structured Development of Virtual Environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications* (pp. 353-378). Mahwah: Lawrence Erlbaum.

Wilson, J., Nichols, S. & Haldane, C. (1997). Presence and side effects: complementary or contradictory? In G. Salvendy, M. J. Smith & R. Koubek (Eds.), *Design of Computing Systems: Social and Ergonomic Considerations* (pp. 889-892). Amsterdam: Elsevier.

Witmer, B. G. & Singer, M. J. (1994). *Measuring immersion in virtual environments. ARI Technical Report 1014*. Alexandria: U. S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.

- Witmer, B. G., Bailey, J. H., Knerr, B. W. & Parsons, K. C. (1996). Virtual spaces and real world places. Transfer of route knowledge. *International Journal of Human Computer Studies*, 45 (4), 413-428.
- Witmer, B. G. & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7 (3), 225-240.
- Yang, G., Gaines, J. A. & Nelson, B. J. (2003). A supervisory wafer-level microassembly system for hybrid MEMS fabrication. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 37 (1), 43-68.
- Yokokohji, Y., Hollis, R. L. & Kanade, T. (1999). WYSIWYF display: a visual/haptic interface to virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8 (4), 412-434.
- You, S. & Neumann, U. (2001). Fusion of vision and gyro tracking for robust augmented reality registration. *IEEE Virtual Reality, Yokohama, Japan, March 13-17*, 71-78.
- Youngblut, C. & Huie, O. (2003). The Relationship between Presence and Performance in Virtual Environments: Results of a VERTS Study. *IEEE Virtual Reality, Los Angeles, CA, March 22-26*, 277-279.
- Zhai, S. (1995). *Human Performance in Six Degrees of Freedom Input Control*. Dissertation Thesis. University of Toronto.
- Zhai, S., Milgram, P. & Buxton, W. (1996). The Influence of Muscle Groups on Performance of Multiple Degree-of-Freedom Input. *CHI 1999: Conference on Human Factors in Computing Systems, Vancouver, Canada, April 13-18*, 308-315.
- Zhai, S., Milgram, P. & Rastogi, A. (1997). Anisotropic Human Performance in Six Degree-of-Freedom Tracking: An Evaluation of 3D Display and Control Interfaces. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics – part A: Systems and Human*, 27 (4), 518-528.
- Zhai, S. & Senders, J. W. (1997a). Investigating coordination in multidegree of freedom control I: time-on-target analysis of 6 DOF tracking. *41st Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomic Society, Santa Monica, CA, September 22-26*, 1249-1254.
- Zhai, S. & Senders, J. W. (1997b). Investigating coordination in multidegree of freedom control II: correlation analysis in 6 DOF tracking. *41st Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomic Society, Santa Monica, CA, September 22-26*, 254-1258.
- Zhai, S. (1998). User Performance in Relation to 3D Input Device Design. *Computer Graphics*, 32 (4), 50-54.
- 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, Los Angeles, CA, April 18-23*, 320-327.

Zhao, S. (2003). "Being there" and the role of presence technology. In G. Riva, F. Davide & W. A. Ijsselstein (Eds.), *Being There: concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments* (pp. 138-146). Amsterdam: Ios Press.

Zhou, Y. & Nelson, B. J. (2000). The effect of material properties and gripping force on micrograsping. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 24-27*, 1115-1120.

Zuberbühler, H. J., Ruegg, S., Krueger, H. & Kündig, A. (2002). Intermedia Synchronisation in Network Design: using an adaptive psychophysical method to specify the perceivable audio-visual delay. *Work With Display Units: World Wide Work, Berchtesgaden, Deutschland, 22-25 Mai*, verfügbar unter: <http://www.wsl.ch/staff/hans-joerg.zuberbuehler> [1.06.2004].

Zwisler, R. (2001). Haptische Wahrnehmung in der Mensch-Maschine-Interaktion. In M. Grunwald & L. Beyer, L. (Hrsg.), *Der bewegte Sinn – Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung* (S. 161-170). Basel: Birkhäuser Verlag.

Anhang A Statistische Prüfgrößen

Die Endnoten fassen die relevanten statistischen Prüfgrößen der empirischen Untersuchungen zusammen: Die linke Spalte spezifiziert das angewandte inferenzstatistische Verfahren sowie die zugrunde liegenden Parameter; die rechte Spalte führt die statistischen Kenngrößen auf. Dabei wird zunächst der Testwert angegeben und gekennzeichnet, ob es sich um ein signifikantes* oder um ein sehr signifikantes** Ergebnis handelt. Das jeweilige Signifikanzniveau ist in Klammern notiert. Schließlich folgt die Stichprobengröße, die sich bei den Within-Subject Designs aus der Anzahl der Versuchspersonen und der bearbeiteten Durchgänge zusammensetzt. Bei der ersten Endnote ist zusätzlich das resultierende Bestimmtheitsmaß aufgeführt.

- | | | |
|---|--|---|
| 1 | ANOVA zur Voraussetzungsprüfung einer linearen Regression für den Parameter ‚Präsenzerleben‘ | F = 9.13** (0.01); N = 96; R ² = 0.212 |
| | ANOVA zur Voraussetzungsprüfung einer linearen Regression für den Parameter ‚Bearbeitungszeit‘ | F = 8.09** (0.01); N = 96; R ² = 0.447 |
| 2 | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Immersionbereitschaft‘ und ‚Präsenzerleben‘ | r = 0.46** (0.01); N = 96 |
| 3 | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Immersionbereitschaft‘ und ‚Bearbeitungszeit‘ | r = -0.37 (0.07); N = 96 |
| 4 | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Präsenzerleben‘ und ‚Bearbeitungszeit‘ | r = -0.40* (0.04); N = 96 |
| 5 | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Bewegungsantizipation‘ und ‚Präsenzerleben‘ | r = 0.21 (0.10); N = 96 |
| | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Bewegungsantizipation‘ und ‚Bearbeitungszeit‘ | r = 0.46** (0.01); N = 96 |
| | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Koordination von Drehbewegungen‘ und ‚Präsenzerleben‘ | r = 0.11 (0.12); N = 96 |
| | Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Koordination von Drehbewegungen‘ und ‚Bearbeitungszeit‘ | r = 0.40* (0.02); N = 96 |

- 6 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Koordination von Translationsbewegungen‘ und ‚Koordination von Rotationsbewegungen‘ T = 10.59** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Koordination von Translationsbewegungen‘ und ‚Koordination von Translations-Rotationsbewegungen‘ T = 13.69** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- 7 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Koordination von Translationsbewegungen mit der Spezialeingabe‘ und ‚Koordination von Translationsbewegungen mit der Metapher‘ T = 4.30** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Koordination von Translationsbewegungen mit der Spezialeingabe‘ und ‚Koordination von Translationsbewegungen mit dem Joystick‘ T = 6.20** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- 8 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Koordination von Translations-Rotationsbewegungen mit der Spezialeingabe‘ und ‚Koordination von Translations-Rotationsbewegungen mit der Metapher‘ T = -4.21** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Koordination von Translations-Rotationsbewegungen mit der Spezialeingabe‘ und ‚Koordination von Translations-Rotationsbewegungen mit dem Joystick‘ T = -4.43** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- 9 Zweiseitiger t-Test für die Parameter ‚Translationsfehler‘ und ‚Rotationsfehler‘ T = -39.14** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- 10 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Bewegungsfehler bei Rotationen um den Nickwinkel‘ und ‚Bewegungsfehler bei Rotationen um den Rollwinkel‘ T = -1.54** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- 11 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Ausgabedrehmomente bei der Spezialeingabe‘ und ‚Ausgabedrehmomente bei der Metapher‘ T = -3.74** (0.01); N = 11 · 6 = 66
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Ausgabedrehmomente bei der Spezialeingabe‘ und ‚Ausgabedrehmomente beim Joystick‘ T = -3.74** (0.01); N = 11 · 6 = 66

- 12 ANOVA für die Parameter ‚Ausgabekräfte bei der Spezialeingabe‘, ‚Ausgabekräfte bei der Metapher‘ und ‚Ausgabekräfte beim Joystick‘ $F = 1.47 (0.24); N = 11 \cdot 6 = 66$
- 13 Pearson-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Präsenzerleben‘ und ‚Immersionbereitschaft‘ bei der sensomotorischen Untersuchung $r = 0.41^{**} (0.01); N = 25 \cdot 6 = 150$
- Spearman-Korrelationsanalyse für die Parameter ‚Präsenzerleben‘ und ‚Rangordnung‘ bei der sensomotorischen Untersuchung $r = 0.27^{**} (0.01); N = 25 \cdot 6 = 150$
- 14 ANOVA für die Parameter ‚Bearbeitungszeit ohne Kraftfeedback‘, ‚Bearbeitungszeit mit Kraftfeedback‘ und ‚Bearbeitungszeit mit augmentiertem Kraftfeedback‘ $F = 1.96 (0.16); N = 60$
- 15 ANOVA für die Parameter ‚Präsenzerleben ohne Kraftfeedback‘, ‚Präsenzerleben mit Kraftfeedback‘ und ‚Präsenzerleben mit augmentiertem Kraftfeedback‘ $F = 4.80^* (0.03); N = 60$
- 16 ANOVA für die Parameter ‚Tiefe der Gewebeerletzung beim manuellen Eingriff‘, ‚Tiefe der Gewebeerletzung beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚Tiefe der Gewebeerletzung beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $F = 1.13 (0.35); N = 25 \cdot 6 = 150$
- ANOVA für die Parameter ‚Länge der Gewebeerletzung beim manuellen Eingriff‘, ‚Länge der Gewebeerletzung beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚Länge der Gewebeerletzung beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $F = 0.79 (0.58); N = 25 \cdot 6 = 150$
- ANOVA für die Parameter ‚Anzahl der Gewebeerletzungen beim manuellen Eingriff‘, ‚Anzahl der Gewebeerletzungen beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚Anzahl der Gewebeerletzungen beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $F = 1.13 (0.35); N = 25 \cdot 6 = 150$
- 17 ANOVA für die Parameter ‚Tiefe der Arterienverletzung beim manuellen Eingriff‘, ‚Tiefe der Arterienverletzung beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚Tiefe der Arterienverletzung beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $F = 3.19^* (0.05); N = 25 \cdot 6 = 150$

- 18 ANOVA für die Parameter ‚freigelegte Fläche beim manuellen Eingriff‘, ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $F = 31.29^{**} (0.01); N = 25 \cdot 6 = 150$
- 19 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $T = 0.18 (0.87); N = 25 \cdot 6 = 150$
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚freigelegte Fläche beim manuellen Eingriff‘ und ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ $T = -1.06^{**} (0.01); N = 25 \cdot 6 = 150$
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚freigelegte Fläche beim manuellen Eingriff‘ und ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $T = -1.24^{**} (0.01); N = 25 \cdot 6 = 150$
- 20 Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Tiefe der Arterienverletzung beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ und ‚Tiefe der Arterienverletzung beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $T = 0.43 (0.26); N = 25 \cdot 6 = 150$
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Tiefe der Arterienverletzung beim manuellen Eingriff‘ und ‚Tiefe der Arterienverletzung beim Robotereingriff ohne Kraftfeedback‘ $T = -0.19 (1.00); N = 25 \cdot 6 = 150$
- Bonferroni Post-Hoc-Test für die Parameter ‚Tiefe der Arterienverletzung beim manuellen Eingriff‘ und ‚Tiefe der Arterienverletzung beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $T = -0.62^* (0.05); N = 25 \cdot 6 = 150$
- 21 Zweiseitiger t-Test für die Parameter ‚Anzahl der Schnitte beim manuellen Eingriff‘ und ‚Anzahl der Schnitte beim Robotereingriff mit Kraftfeedback‘ $T = -2.73^* (0.02); N = 25 \cdot 6 = 150$
- 22 ANOVA für die Parameter ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_1 ‘, ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_2 ‘, ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_3 ‘ und ‚freigelegte Fläche beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_4 ‘ $F = 0.74 (0.53); N = 25 \cdot 6 = 150$

ANOVA für die Parameter ‚Anzahl der Arterienverletzungen beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_1 ‘, ‚Anzahl der Arterienverletzungen beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_2 ‘, ‚Anzahl der Arterienverletzungen beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_3 ‘ und ‚Anzahl der Arterienverletzungen beim Robotereingriff mit der Kraftskalierung x_4 ‘

$F = 0.87 (0.46)$; $N = 25 \cdot 6 = 150$

Anhang B Berechnung der Bewegungskoordination/effizienz

Bewegungen im Raum sind durch drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade beschrieben, die sich in Form von Matrizen darstellen lassen (z.B. Altmann, 1986).

Die *Translationsmatrix* T setzt sich aus den Komponenten eines dreidimensionalen Vektors a zusammen, der die Bewegung in die Horizontale a_x , die Vertikale a_y und die Tiefe a_z beschreibt (1).

$$T(a_x, a_y, a_z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & 1 & 0 & a_y \\ 0 & 0 & 1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die *Rotationsmatrix* R ist durch einen dreidimensionalen Vektor und einen Drehwinkel um die Achse gegeben. Die Achse der Drehung ist der Vektor $r = (r_x, r_y, r_z)$ T und der Drehwinkel wird mit θ bezeichnet (2).

Der Winkel θ berechnet sich aus den Elementen der Hauptdiagonalen und bildet die Grundlage zur Bestimmung der Drehachse r (3).

$$R(r, \theta) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = \arccos \frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \quad r = \frac{1}{2 \sin \theta} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Das Produkt aus der Translations- und der Rotationsmatrix führt zur *Transformationsmatrix* A . Mit dieser Abbildung lässt sich jeder Vektor im dreidimensionalen Raum in einen beliebig anderen transformieren (4).

$$A = TR = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & a_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & a_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

In dem Experiment zur Motorik (S. 46) wurden die Bewegungseingaben der Probanden mehrere Male pro Sekunde in Form der *Transformationsmatrix A* erfasst. Auf dieser Datenbasis wurde dann die Berechnung der Bewegungseffizienz und der Bewegungskoordination vorgenommen (Zhai, 1995).

Berechnung der Bewegungseffizienz

Eine Bewegung wird im Folgenden als effizient bezeichnet, wenn die beobachtete Trajektorie möglichst wenig von der kürzesten Verbindung abweicht und deshalb sowohl der Translations- als auch der Rotationsfehler gering ist.

Zur Berechnung wurde zunächst für jeden Messzeitpunkt i der *Translationsfehler* durch die euklidische Distanz T_i des aktuellen Punktes t_i zum Zielpunkt t_n bestimmt (5).

Als Maß für die Bewegungseffizienz wurde dann aus den euklidischen Distanzen der *mittlere quadratische Fehler (MQF)* berechnet, wobei N die Anzahl der Messzeitpunkte bezeichnet (6).

$$T_i = (t_i - t_n) \quad (5)$$

$$T_{MQF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N T_i^2}{N}} \quad (6)$$

Um den Bewegungsfehler für die Horizontale X , die Vertikale Y und die Tiefe Z getrennt zu bestimmen, wurde die Berechnung für jede der drei Achsen durchgeführt. Dabei gilt: Je größer die Werte X_{MQF} , Y_{MQF} beziehungsweise Z_{MQF} sind, umso größer sind jeweils die Translationsfehler (7).

$$X_{MQF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N X_i^2}{N}}; \quad Y_{MQF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N Y_i^2}{N}}; \quad Z_{MQF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N Z_i^2}{N}} \quad (7)$$

Die Berechnung der *Rotationsfehler* erfolgte analog: Zunächst wurde für jeden Messzeitpunkt i die Abweichung der aktuellen Position von der Zielposition bestimmt. Das Ergebnis wird mit $R(\Phi_i n_i)$ bezeichnet und beschreibt, dass beim Durchgang i die Bewegungseingabe entlang der Achse n_i um den Betrag Φ_i vom Zielpunkt abweicht. Der Ein-

heitsvektor $n_i = (n_x, n_y, n_z)$ und Φ_i können auch zu einem einzigen Rotationsvektor kombiniert werden (8).

$$\Phi_i = \Phi_i n_i = (\Phi_i n_{xi}, \Phi_i n_{yi}, \Phi_i n_{zi}) = (\Phi_{xi}, \Phi_{yi}, \Phi_{zi}) \quad (8)$$

Bei Φ_{xi} , Φ_{yi} und Φ_{zi} handelt es sich nicht um die Eulerwinkel, sondern um die Projektionen des Vektors Φ_i auf die X-, Y- und Z-Achsen. Die Werte von Φ_x , Φ_y und Φ_z beschreiben folglich die Neigung von Φ_i in Richtung der X-, Y- und Z-Achsen. Je größer zum Beispiel der Wert Φ_x ist, umso stärker ist der Rotationsvektor Φ_i gegenüber der horizontalen Achse geneigt (Abb. 35).

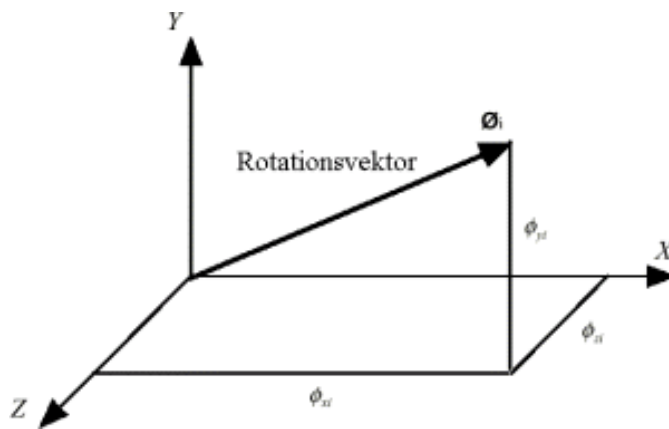


Abb. 35: Bestimmung des Rotationsfehlers über den Rotationsvektor Φ_i (Zhai, 1995).

Analog zur Berechnung des Translationsfehlers, wurde auch hier der mittlere quadratische Fehler für jeden Durchgang berechnet, so dass schließlich R_{xMQF} , R_{yMQF} und R_{zMQF} den Bewegungsfehler der drei rotatorischen Freiheitsgrade bezeichnen (9).

$$R_{xMQF} = \frac{\sum_{i=0}^N |\Phi_{xi}^2|}{N}; \quad R_{yMQF} = \frac{\sum_{i=0}^N |\Phi_{yi}^2|}{N}; \quad R_{zMQF} = \frac{\sum_{i=0}^N |\Phi_{zi}^2|}{N} \quad (9)$$

Berechnung der Bewegungskoordination

Von einer koordinierten Bewegung wird im Folgenden gesprochen, wenn der Proband zwei Freiheitsgrade gleichzeitig zielführend kommandieren konnte.

Die *Bewegungskoordination* wurde aus den Bewegungsfehlern abgeleitet: Liegt eine simultane Koordination zweier Freiheitsgrade vor, so müssen die mittleren quadrati-

schen Fehler bei jeder Messung i auch miteinander zu- beziehungsweise abnehmen. Dieser Sachverhalt lässt sich mit einer linearen Korrelationsanalyse erfassen, wobei für jeden experimentellen Durchgang fünfzehn Korrelationskoeffizienten ermittelt wurden, die in Tabelle 10 zusammengefasst sind.

Die erste Berechnung $r(X_i; Y_i)$ überprüft zum Beispiel, inwieweit Bewegungen entlang der X-Achse gleichzeitig mit Bewegungen entlang der Y-Achse koordiniert werden konnten. Besteht eine positive Korrelationsbeziehung, so liegt eine koordinierte Bewegung zwischen den beiden Freiheitsgraden vor. Würde sich hingegen ein negativer Zusammenhang zeigen, so würde eine Fehlerreduktion entlang der einen Bewegungsdimension zu einer Fehlerzunahme in der anderen Dimension führen und die Bewegung müsste als unkoordiniert bezeichnet werden.

<i>Translationen</i>	$r(X_i; Y_i)$	$r(X_i; Z_i)$	$r(Y_i; Z_i)$
<i>Rotationen</i>	$r(\Phi_x; \Phi_y)$	$r(\Phi_x; \Phi_z)$	$r(\Phi_y; \Phi_z)$
<i>Translationen-Rotationen</i>	$r(X_i; \Phi_x)$	$r(X_i; \Phi_y)$	$r(X_i; \Phi_z)$
	$r(Y_i; \Phi_x)$	$r(Y_i; \Phi_y)$	$r(Y_i; \Phi_z)$
	$r(Z_i; \Phi_x)$	$r(Z_i; \Phi_y)$	$r(Z_i; \Phi_z)$

Tab. 10: Berechnung der Bewegungskoordination.

Betrachtet man alle experimentellen Durchgänge zusammen, so stellt der prozentuale Anteil der positiven und negativen Korrelationen für jeden der fünfzehn Ausdrücke eine Maßzahl für die simultane Koordinationsfähigkeit dar (Zhai & Senders, 1997b).