

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

**GESTALTUNG VISUELL-HAPTISCHER
TELEPRÄSENZ- UND TELEAKTIONSSYSTEME
MITTELS PSYCHOLOGISCHER GRUNDLAGEN**

Dipl.-Psych. Franziska Freyberger

PROMOTIONS-AUSSCHUSS:

- Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Günther Dollinger
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Berthold Färber
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Martin Buss
(Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik,
TU München)

Tag der Prüfung: 18.02.2008

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Für meinen Vater.

DANK

Im Februar 2008 konnte ich meine wissenschaftliche Tätigkeit im Kooperationsprojekt des Sonderforschungsbereiches „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ erfolgreich mit meiner Dissertation abschließen.

Für diesen Erfolg gilt mein besonderer Dank meinen beiden Professoren, Prof. Färber und Prof. Buss. Prof. Färber hat mir an seinem Lehrstuhl die große Freiheit zur Entfaltung meiner Forschung gegeben und unterstützt. Prof. Buss gilt mein besonderer Dank für sein Interesse und seine wohlwollende Förderung der psychophysischen und experimentellen Untersuchungen. Die Integration in sein Team war mir dabei eine große Hilfe.

Für kritische Diskussion und fruchtbare Zusammenarbeit, die sich auch in international gewürdigten Publikationen niedergeschlagen hat, danke ich meinem Kollegen Martin Kuschel.

Ebenso möchte ich meiner Kollegin Helena Pongrac für die hilfreichen Hinweise, die fachliche Diskussion und Kooperation während der gesamten Zeit am Lehrstuhl danken. Gemeinsam war es uns möglich, die Bedeutung der Psychologie für diese interdisziplinäre Kooperation zu festigen.

Nicht unerwähnt lassen will ich außerdem die Unterstützung meiner Kollegen an der UniBW und dem LSR und meiner Familie.

Da experimentell gestützte Forschung komplexer technischer Aufbauten bedarf, möchte ich für die prompte und kompetente die Arbeit der Werkstätten der UniBW und insbesondere des Teams der feinmechanischen Werkstatt des LSR herzlich danken.

1	Mensch-System-Interaktion	11
1-1	Problemstellung	15
2	Das somatosensorische System	21
2-1	Reizaufnahme	23
2-1-1	Das taktile System	23
2-1-2	Proprozeptives System	27
2-2	Zentrale somatosensorische und sensumotorische Verarbeitung	28
2-3	Informationsgewinnung – Explorationsbewegungen	30
2-4	Wahrnehmung von Textur	31
2-5	Wahrnehmung von Temperatur	32
2-5-1	Statisches und dynamisches Temperaturempfinden	33
2-5-2	Temperaturempfinden bei Objektkontakt	35
2-6	Wahrnehmung von Bewegung, Position und aufgewendete Kraft	36
2-6-1	Wahrnehmung von Bewegung und Position	36
2-6-2	Wahrnehmung von Kraft	39
3	Methoden zur Erfassung menschlicher Wahrnehmung – Psychophysik	41
3-1	Die „klassische“ Psychophysik	42
3-1-1	Absolut- und Unterschiedsschwelle	42
3-1-2	Methoden zur Schwellenbestimmung	43
3-2	Signalentdeckungstheorie	48
3-2-1	Detektionsaufgabe	49
3-2-2	Diskriminierung	50
3-3	Psychophysische Skalierung	51
3-3-1	Direkte Skalierung und die Empfindungsstärke	51
3-3-2	Methoden der Skalierung	51
4	Teil I Menschliches Auflösungsvermögen ausgewählter haptischer Reize	53
4-1	Wahrnehmung von Oberflächentextur	55
4-1-1	Theoretischer Hintergrund	55
4-1-2	Methode	59
4-1-3	Experimentalblock I – Auflösungsvermögen von Oberflächentextur	63
4-1-4	Diskussion	67
4-2	Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit	70
4-2-1	Theoretischer Hintergrund	70
4-2-2	Allgemeine Methode	74
4-2-3	Experimentalblock II – Auflösungsvermögen von Objektnachgiebigkeit	76
4-2-4	Experimentalblock III – Einfluss zusätzlicher taktiler Information	82
4-2-5	Zusammenfassende Diskussion	88
4-3	Wahrnehmung von Objektkanten	90
4-3-1	Theoretischer Hintergrund	90
4-3-2	Methode	93
4-3-3	Experimentalblock IV – Auflösungsvermögen von Objektkanten	96
4-3-4	Diskussion	98
4-4	Zusammenfassung	100

5	Teil II Intrahaptische Interaktion – Darbietung zusätzlicher Information	103
5-1	Informationsintegration an einem Finger	104
5-1-1	Theoretischer Hintergrund	104
5-1-2	Vorstudie zur Wahrnehmung von Temperatur	107
5-1-3	Methode zur Untersuchung intrahaptischer Illusionen	114
5-1-4	Experimentalblock V – Intrahaptische Illusionen	117
5-1-5	Zusammenfassung	121
5-2	Informationsintegration über drei Finger	124
5-2-1	Theoretischer Hintergrund	124
5-2-2	Das haptische Interface	126
5-2-3	Experimentalblock VI – Wahrnehmung von Oberflächenneigung	128
5-2-4	Experimentalblock VII – Wahrnehmung der Fingerabweichung	136
5-2-5	Zusammenfassung	148
6	Integration sensorischer Informationen	149
6-1	Neuronale Grundlagen	149
6-2	Grundlagen multisensorischer Integration	150
6-2-1	Modelle sensorischer Integration	151
6-2-2	Voraussetzungen für Integration	153
6-2-3	Untersuchung von Integration	154
6-3	Intermodale visuell-haptische Integration	156
6-3-1	Visuell-haptische Diskrepanzen und sensorische Dominanz	156
6-3-2	Einflussfaktoren auf sensorische Dominanz	158
6-3-3	Grenzen der Integration	159
7	Teil III Intermodale Interaktion – Integrationsgrenzen und sensorische Dominanz	161
7-1	Multimodale Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit	163
7-1-1	Theoretischer Hintergrund	163
7-1-2	Experimentalumgebung	166
7-1-3	Experimentalblock VIII – Unimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit	168
7-1-4	Experimentalblock IX – Intermodale Integration	173
7-1-5	Experimentalblock X – Grenzen der Integration	189
7-1-6	Zusammenfassung	201
7-2	Wahrnehmung von Objektkanten	203
7-2-1	Theoretischer Hintergrund	203
7-2-2	Experimentalumgebung	204
7-2-3	Experimentalblock XI – Intermodale Integration und Einfluss der Positionierung	206
7-2-4	Experimentalblock XII – Grenzen der Integration	212
7-2-5	Allgemeine Diskussion	218
7-3	Zusammenfassung	220
8	Teil IV Evaluation: Einfluss Bimodaler Inkongruenzen auf die Wahrnehmung	223
8-1	Bimodale Inkongruenzen bei der Darstellung von Objektnachgiebigkeit	225
8-1-1	Methode	226
8-1-2	Experimentalblock XIII – Evaluation inkongruenter Darstellung von Nachgiebigkeit	228
8-1-3	Nacherhebung	234
8-1-4	Allgemeine Diskussion	240

8-2	Bimodale Inkongruenzen bei der Darstellung von Objektkanten.....	242
8-2-1	Methode.....	243
8-2-2	Experimentalblock XIV –Evaluation inkongruenter Darstellung von Kanten	245
8-2-3	Diskussion	249
8-3	Zusammenfassung	250
9	Ergebniszusammenfassung und Forschungsausblick.....	251
	Abkürzungsverzeichnis	255
	Glossar	257
	Anhang	259
A)	Berechnung der Räumlichen Periode für Schleifpapier (s. Abschnitt 4-1)	260
A1)	Auszug aus Suchbegriff „Schleifpapier“.....	260
A2)	Suchbegriff „Mesh“	260
A3)	Berechnung der räumlichen Periode für selbst hergestelltes gekörntes Papier 261	
B)	Herstellung der Silikonproben (s. Abschnitt 4-2)	262
B1)	Bestimmung der Nachgiebigkeit der Silikonproben	262
B2)	Herstellung der Silikonproben ohne Textur (s. Abschnitt 4-2-3)	263
B3)	Kontrolle der Fingertemperatur in der Stichprobe (s. Abschnitt 4-2-3)	264
B4)	Herstellung der Silikonproben mit und ohne Textur (s. Abschnitt 4-2-4)	265
C)	Intrahaptische Illusionen: Nicht berichtete Ergebnisse (s. Abschnitt 5-1).....	266
D)	Immersionsfragebogen.....	267
E)	Oberflächenneigung am HSI: Nicht berichtete Ergebnisse (s. Abschnitt 5-2)	268
F)	Reizauswahl für Konstanzmethode (s. Abschnitt 7-1-4).....	269
F1)	Stimuli bei haptischer Darstellung (Gruppe H)	269
F2)	Stimuli bei visueller Darstellung (Gruppe V)	269
F3)	Stimuli bei visuell-haptisch kongruenter Darstellung (Gruppe VH).....	270
F4)	Stimuli bei bimodal inkongruenter Darstellung (Gruppe VHI)	270
	Literaturverzeichnis	271

1 MENSCH-SYSTEM-INTERAKTION

Die heutige Generation technischer Systeme aus Beispielbereichen wie der minimal invasiven Chirurgie in der Medizintechnik als Teilbereich der Tele-Robotik, dem zukünftigen *Drive by Wire* in der Kraftfahrzeugtechnik, der Mikromontage in der Montage- und Fertigungstechnik, der Telebeobachtung und -sicherung in der Erkundungs- und Bekämpfungstechnik zeichnet sich durch eine komplexe und enge Verkopplung mit dem bedienenden Menschen aus. Diese Koppelstelle, englisch als *Human System Interface* oder kurz *HSI* bezeichnet, muss es dem Bediener ermöglichen, die semiautonomen Funktionen des Systems natürlich und intuitiv einzusetzen, um so die gestellte Aufgabe optimal und ggf. auch kreativ lösen zu können.

Dies kann nur erreicht werden, wenn das HSI mehrere Sinne des Bedieners anspricht und unterstützt. Es muss demnach über die konventionell unterstützte visuelle und auditive Modalität auch die haptische Modalität mit einbeziehen. Haptische Fähigkeiten umfassen die taktile Wahrnehmung beim Berühren genauso wie die Propriozeption, d.h. die beim Greifen und Manipulieren entstehende Wahrnehmung. Die technisch relevante Fragestellung nach dem „wie viel Haptik und wofür im HSI“ kann ohne Rückgriff auf psychologische Grundlagen nicht beantwortet werden. Am Beispiel der Telerobotik will die vorliegende Arbeit zur Beantwortung dieser Frage beitragen, wobei die Ergebnisse auch auf andere technische Systeme zu übertragen sind.

Bevor allerdings in medias res gegangen werden kann, ist es unumgänglich, die allgemeine Problematik der Tele-Robotik und relevante Gesichtspunkte bei der Gestaltung der Mensch-Roboter-Schnittstelle kurz zusammenzufassen. Nur so wird die Zielsetzung dieser Arbeit kontextualisiert und verständlich.

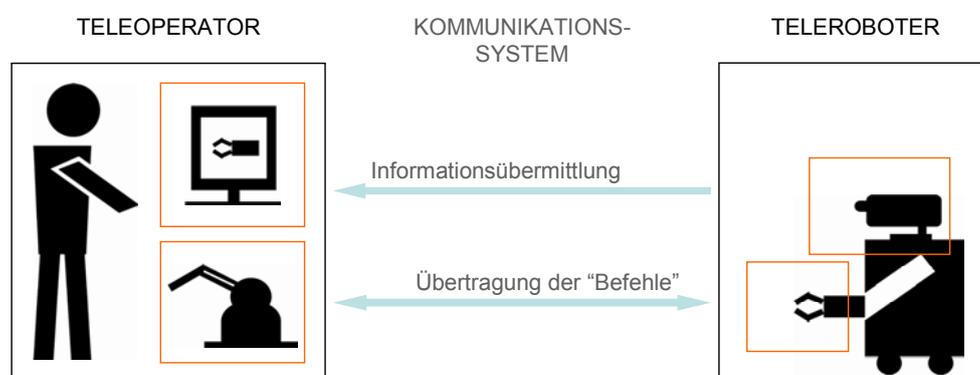


Abb. 1-1 Schematische Darstellung eines multimodalen Telepräsenz- und Teleaktionssystems.

Allgemeines zur Tele-Robotik. Überall dort, wo die Zugänglichkeit des Arbeitsumfeldes für den Menschen physikalisch oder physisch begrenzt oder auch gänzlich unmöglich ist, kann ihm der Einsatz von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen das Agieren in gewohnter „präsen-ter“ Weise erlauben (für einen Überblick s. Buss & Schmidt, 1999; Burdea, 1996; Sheridan, 1992a). Zu den Hemmnissen, sog. Barrieren, zählen beispielsweise Orte, deren Zutritt aufgrund einer Gefahr für Leib und Leben nicht möglich ist, beispielsweise bei der Kampfmittelbeseitigung (z.B. Kron & Schmidt, 2005). Zum anderen können Orte Barrieren darstellen, die aufgrund ihrer großen Entfernung, wie der Weltraum (s. Reintsema, Preusche, Ortmaier & Hirzinger, 2004; Preusche, Ortmeier & Hirzinger, 2002), oder aufgrund ihrer kleinen bis mikroskopischen Größe, wie bei der minimal-invasiven Chirurgie (z.B. Deml,

Ortmeier & Seibold, 2005; Freyberger, Popp, Färber, Mayer & Schirmbeck, 2005) eine Problembehandlung behindern. Auch die Ausdehnung des Arbeitsfeldes kann direktes Handeln erschweren, wie bei der Mikromontage (vgl. Zäh, Petzold, Anton, Ehrensträßer & Schilp, 2002). Barrieren, die ein direktes Agieren des Menschen verhindern, lassen sich also als Verträglichkeit und/oder als Entfernung und/oder als Ausmaße der Umgebung zusammenfassen.

Telepräsenz- und Teleaktionssysteme (TPTA-Systeme) ermöglichen dem Menschen, derartige Barrieren zu überwinden und mithilfe eines Roboters als Teleoperator in einer realen Umgebung aktiv zu werden. Eine effektive und sichere Aufgabenausführung über Distanz – viele tausend Kilometer bei Arbeiten im Orbit oder nur wenige Zentimeter im Falle minimal-invasiver Chirurgie – verlangt neben aufgabenrelevanter Informationen über und aus der Umgebung auch eine direkte Manipulation, resp. Teleaktion des Roboters. Wie illustriert in Abbildung 1-1, besteht ein derartiges Mensch-Roboter-System aus drei wesentlichen Komponenten: Der Benutzerseite, der entfernten Umgebung mit der ausführenden Einheit sowie dem verbindenden Kommunikationsnetz, über das Kommando- und Sensorsignale zwischen Operator und Teleoperator vermittelt werden.

Der Benutzer kommandiert über eine Mensch-System-Schnittstelle den entfernten Roboter: Optische, akustische und auch haptische Ausgabegeräte (wie z.B. Bildschirm, Lautsprecher, Joystick) ermöglichen es ihm, seine haptischen Eingaben zu überwachen (s. auch Abbildung 1-2). Auf Teleroboterseite werden die Befehle online mithilfe der Effektoren des Roboters umgesetzt. Visuelle, auditive und haptische (taktile und propriozeptive) Informationen werden über Sensoren des Roboters aufgenommen und an die Ausgabegeräte des Operator-Arbeitsplatzes zurückgemeldet. Somit entsteht ein geschlossener Regelkreis (s. Buss & Schmidt, 1999).

Ist der Endeffektor nicht, wie bisher betrachtet ein Teleroboter in realer Umwelt, sondern werden die an das HSI zurückgemeldeten sensorischen Informationen computergeneriert, spricht man von Interaktion innerhalb einer „virtuellen“ Umgebung (VR). Bei dieser Mensch-System-Interaktion wird die ausführende Einheit in der Umwelt durch Modellbeschreibungen und Rechenprozesse eines Computers ersetzt. Dieses Szenario erfährt bei Trainingsaufgaben in technischen sowie nichttechnischen Einsatzfeldern, aber auch im Unterhaltungssektor wachsende Bedeutung und ist besonders geeignet für grundlegende experimentelle Untersuchungen.

Das Arbeiten mit Tele-Präsenzsystemen oder mit VR-Systemen verlangt dabei nicht notwendigerweise Multimodalität, d.h. die Informationsvermittlung an mehr als einen menschlichen Sinneskanal (Modalität): Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass Redundanz sensorischer Information die Bewältigung komplexer Aufgaben erleichtert und das *Präsenz-erleben* erhöht, auf das weiter unten näher eingegangen wird (vgl. Hecht, Reiner & Halevy, 2006; Grundwald & Beyer, 2001; Stanney, Mourant & Kennedy, 1998; Lombard & Ditton, 1997; Sheridan, 1992b; Steuer, 1992; Burdea, ch. 9, 1981).

Alle modalitätsspezifischen Sensorsignale aus der entfernten Umgebung sowie die Kommandosignale des menschlichen Benutzers werden über ein Kommunikationssystem ausgetauscht. Die Datenübertragung kann dabei über das Internet netzbasiert oder, z.B. über Satellitenverbindung, direkt erfolgen (s. Letschnik, Raif, Pauly & Walter, 2005; Hirche, Stanczyk & Buss, 2004). Das Internet bietet mit weltweitem Zugriff, hoher Flexibilität und Kostengünstigkeit zwar Vorteile, denen jedoch unter anderem beschränkte Bandbreite, zugriffsabhängige, schwankende Latenzen oder Datenverluste gegenüberstehen.

Die Menge zu übertragender Information wiederum ist abhängig von der möglichen technischen Darstellungsgüte sowie von der für die menschliche Verarbeitung notwendigen (modalitätsspezifischen) Bandbreite (s. für einen Überblick z.B. Burdea, ch. 2, 1996; Barfield, Hendrix, Bjorneseth, Kaczmarek & Lotens, 1995; Shimoga, 1993; Card, Moran & Newell, 1983). Denn Bandbreitenbeschränkung wie auch Zeitverzögerung können zu einer Destabili-

sierung des Systems führen und erfordern daher stabilisierende unterlagerte Maßnahmen (vgl. Hirche, 2005; Buss & Schmidt, 1999).

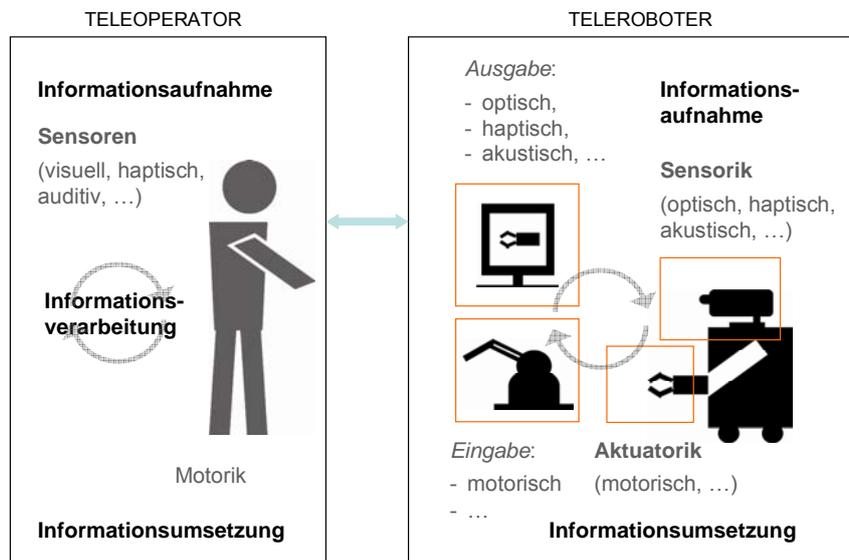


Abb. 1-2 Mensch und Maschine als Informationsverarbeitungssysteme.

Gestaltung der Mensch-Roboter-Schnittstelle. Technologisches Ziel der Gestaltung von TPTA-Systemen ist es, dem Mensch möglichst wirklichkeitsnahe Informationen aus der entfernten Umgebung systemtransparent rückzumelden. Auf diese Weise soll v.a. das (Tele-)Präsenzempfinden des Benutzers erhöht werden (s. Hirche, 2005).

Wirklichkeitsnähe kann durch das HSI z.B. durch Auswahl geeigneter Sensorik und Aktuatorik und der entsprechenden Darstellung der modalitätsspezifischen Information erreicht werden, die sich am kognitiven und perzeptuellen Leistungsvermögen des Menschen orientiert. Wirklichkeitsnähe bezeichnet somit die Güte der Erfassung und Umsetzung der Wirklichkeit durch Sensorik und Aktuatorik. In diesem Zusammenhang wird oft auch von Immersion gesprochen (z.B. Slater & Wilbur, 1997). Da jedoch teilweise auch das Präsenzerleben (s. unten) als „Immersion“ bezeichnet wird, wird, um Verwechslungen zu vermeiden, auf den Begriff im Folgenden ganz verzichtet.

(System-) *Transparenz* wird als objektives Performanzmaß zur Beurteilung eines Telepräsenz- und Teleaktionssystems herangezogen und bedeutet nach Hirche (2005), dass der Benutzer nicht zwischen realer und über das HSI vermittelter Interaktion mit der entfernten Umgebung unterscheiden kann.

Präsenzerleben (gelegentlich auch als Immersion bezeichnet) wird u.a. als „a psychological state characterized by perceiving oneself to be enveloped by, included in, and interacting with an environment that provides a continuous stream of stimuli and experiences“ definiert (Witmer & Singer, 1998, p. 227). Kurz: Präsenzerleben kennzeichnet die Erfahrung des Benutzers, sich in eine (durch ein HSI medierte) Umgebung versetzt wahrzunehmen (vgl. Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000; Witmer & Singer, 1998; Draper, Kaber & Usher, 1998; Lombard & Ditton, 1997; Sheridan, 1996, 1992b; Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995). Oft wird zwischen virtuellem Präsenzerleben (bezogen auf eine computergenerierte Umgebung) und Telepräsenzerleben (bezogen auf eine reale, entfernte Umgebung) unterschieden. Präsenzerleben wird dabei in der Forschung in der Regel als multidimensional angenommen, d.h. mehrere Faktoren tragen zu seinem Entstehen bei (z.B. Schubert, Friedman & Regenbrecht, 2001; Witmer & Singer, 1998). Psychologisch orientierte Ansätze betonen

die Bedeutung von Faktoren wie Aufmerksamkeit, Attribution oder Situationsbewusstsein (für einen Überblick s. Draper et al., 1998; vgl. auch Pongrac, Leupold, Behrendt, Färber & Färber, 2007; Witmer & Singer, 1998). Eher an der Schnittstelle orientierte Ansätze stellen Einflussfaktoren wie die Möglichkeit, mit der virtuellen oder telepräsenten Umgebung interagieren zu können (z.B. Steuer, 1992; Barfield et al., 1995; Sheridan, 1996), sowie die Wirklichkeitsnähe bzw. die Qualität der Schnittstelle in den Vordergrund (z.B. IJsselstein, de Ridder, Freeman & Avons, 2000; Mantovani & Riva, 1999; Witmer & Singer, 1998; Stanney et al., 1998; Lombard & Ditton, 1997; Barfield et al., 1995; Sheridan, 1996, 1992b).

Ebenso wenig wie technische Systeme die Realität vollkommen wirklichkeitsnah abbilden können, kann auch der Mensch nicht alle Informationen aus der Umwelt aufnehmen und verarbeiten (z.B. Massaro, 1987; für einen Überblick s. Johannsen, 1993; Geiser, 1990; Bubb, 1981). Auch die Sensorik und Aktuatorik des Menschen ist bandbreitenbeschränkt. Neben der „reinen“ Verarbeitung sensorisch aufgenommener Informationen beeinflussen auch kognitive Faktoren Wahrnehmung und Handlung: Aus den eigenen Handlungen sowie den Veränderungen in der Umgebung wird durch Abgleich mit (gespeicherten) Informationen, ein mentales Modell konstruiert oder angepasst, das eine Interpretation des Geschehens zulässt (für einen Überblick s. Anderson, 1996). Ebenso entwickelt der Benutzer eines TPTA-Systems ein mentales Modell über seine Kommandos und der multimodalen Rückmeldung aus der entfernten Umgebung (z.B. Schubert et al., 2001).

Ziel der Gestaltung von TPTA-Systemen ist demzufolge, dem Bediener bzw. Teleoperator wirklichkeitsnahes Telearbeiten durch hohe Transparenz zu ermöglichen, so dass der Benutzer ein hohes Präsenzerleben erfährt (vgl. Nash et al., 2000). Ein weiteres Ziel ist es, den Benutzer zu befähigen, eine hohe Aufgabenleistung zu erbringen, so dass er mithilfe des TPTA-Systems optimal agieren kann. Dabei ist anzunehmen, dass beide Faktoren sich wechselseitig beeinflussen: Hohes Präsenzerleben geht sicherlich mit einer hohen Aufgabenleistung einher (vgl. Draper et al., 1998; Sheridan, 1996; Barfield et al., 1995; Steuer, 1992).

1-1 Problemstellung

Wie bereits erwähnt, treten in Mensch-Roboter-Systemen grundsätzlich Einschränkungen in der Informationsübertragung auf, die durch Datenverlust, Zeitverzögerung und begrenzte Datenrate entstehen. Diese Unstimmigkeiten müssen nicht notwendigerweise vom Menschen wahrgenommen werden: Der Mensch kann selbst als „Informationsverarbeitungssystem“ aufgefasst werden, dessen Sensoren und Aktuatoren Bandbreitebeschränkungen unterliegen (s. Abbildung 1-2).

Ziel bei der Auslegung eines Gesamt-Telepräsenzsystems muss also sein, im Hinblick auf ein Leistungsoptimum, menschliche (Präsenzepfinden, intuitive Bedienbarkeit) und technische Erfordernisse (sensorische, aktuatorische Konstruktion und Beachtung des Kommunikationsaufwands) gezielt aufeinander abzustimmen. Gerade bei der Datenübertragung können die menschlichen Wahrnehmungsgrenzen ausgenutzt werden, um die Menge der über ein Kommunikationsnetz zu übertragenden Information zu reduzieren und somit der das Präsenzerleben einschränkende Wirkung von z.B. Datenverlust entgegen zu wirken (s. Pongrac, in Vorbereitung). Hier sind Kompressionsverfahren viel versprechend, die Datensätze wahrnehmungsbasiert und verlustbehaftet kodieren. Derartige Methoden wurden bereits für visuelle und auditive Datenströme (MPEG, MP3) erfolgreich angewandt und auf die Reduktion haptischer Daten übertragen (vgl. Hirche, Hinterseer, Steinbach & Buss, 2005a, b). Der sog. *Deadband*-Ansatz erlaubt, den Kommunikationsaufwand haptischer Daten zu minimieren: Er basiert darauf, dass jeweils ein neuer Abtastwert über das Kommunikationsnetz erst dann gesendet wird, wenn die Änderung gegenüber dem vorherigen Wert vom Menschen wahrnehmbar ist (z.B. Hirche et al., 2005a, b; s. auch Kuschel, Kremer, Hirche & Buss, 2006). Diese, die Unterschiedsschwelle (*engl.* Just Noticeable Difference, kurz: JND) übersteigende prozentuale Änderung, bestimmt den Parameter im Deadband-Ansatz und entspricht, aus den Erkenntnissen der Psychophysik gesehen, dem Weber-Bruch bzw. als Prozentwert dem JND-% (s. Kapitel 3).

Darauf aufbauend und auf der Grundlage der bereits auf diesem Gebiet geleisteten Forschung fremder Hand, befasst sich die vorliegende Untersuchung mit den folgenden noch offenen Fragestellungen, die gleichzeitig auch den Aufbau der Arbeit konstituieren. Alle theoretischen Ansätze und Untersuchungsmethoden, die dabei entscheidend und erforderlich sind, werden in entsprechenden Kapiteln einleitend erläutert. Kapitel 2 beschäftigt sich so mit den biologischen und psychologischen Grundlagen somatosensorischer Wahrnehmung und Kapitel 3 stellt die zentralen Konzepte der Psychophysik und deren Methodik vor, an denen sich die vorliegende Arbeit orientiert. In Kapitel 6 werden schließlich Grundlagen multimodaler Integration und für die Diskussion der Ergebnisse bedeutende Ingerationsmodelle aufgezeigt. Dadurch kann diese Arbeit nicht nur einen wichtigen Beitrag zur Gestaltung rein haptischer und visuell-haptischer TPTA-Systeme und zu Grundlagenfragen der menschlichen Wahrnehmung leisten, sondern es kann zuletzt auch abgeschätzt werden, an welchen Stellen Forschung noch notwendig ist und ansetzen muss.

Teil 1 – Menschliches Auflösungsvermögen und Datenreduktion

Wie gut können Menschen Oberflächentextur, Objektnachgiebigkeit und Objektkanten diskriminieren?

Wie beeinflussen externe Faktoren wie die Fingertemperatur und Explorationsbewegungen das haptische Auflösungsvermögen?

Eine effektive Umsetzung des oben vorgestellten psychophysisch motivierten Ansatzes zur Datenreduktion verlangt die Kenntnis menschlicher Unterschiedsschwellen. Trotz umfangreicher Forschung im Bereich der haptischen Wahrnehmung (s. Übersichtsartikel z.B. Johnson, 2002; Shimoga, 1993; Loomis & Lederman, 1986; Clark & Horch, 1986) sind zahlreiche Fragen in Bezug auf das Auflösungsvermögen physikalischer Reize bis heute ungeklärt, gerade, wenn es gilt, in Betracht zu ziehen, dass die menschliche Wahrnehmung auch von zusätzlichen externen Stimuli (vgl. auch Gescheider, 1985) oder von der Art der Exploration beeinflusst wird. Dazu will diese Arbeit einen Beitrag leisten.

Zu berücksichtigen ist dabei grundsätzlich, dass Explorationsbewegungen in der Regel stereotyp sind. Sie sind Basis für die haptische Informationsaufnahme und bestimmen dadurch die Art, wie haptisch wahrnehmbare Objekt- oder Oberflächeneigenschaften aktiv aufgenommen werden (s. Abschnitt 2-3).

Daher wird in dieser Arbeit der Einfluss der Explorationsbewegungen auf das haptische Auflösungsvermögen der menschlichen Wahrnehmung am Beispiel realer (d.h. nicht über ein HSI dargestellter) Materialeigenschaften wie Oberflächentextur und Objektnachgiebigkeit untersucht (s. Abbildung 1-3). Darüber hinaus wird der Einfluss zusätzlicher Stimuli, wie Handtemperatur (s. Abschnitte 4-1 und 4-2) oder Oberflächentextur (s. Abschnitt 4-2) betrachtet (s. Abbildung 1-3), und neben den Materialeigenschaften zusätzlich ein, die geometrische Form eines Objektes bestimmender, Parameter, die Objektkante, in die Untersuchung integriert (s. Abschnitt 4-3). Dadurch sind unterschiedliche, parameterabhängige, relevante Aspekte der Explorationsbewegungen sowie zusätzliche mögliche Einflussfaktoren exemplarisch abgedeckt.

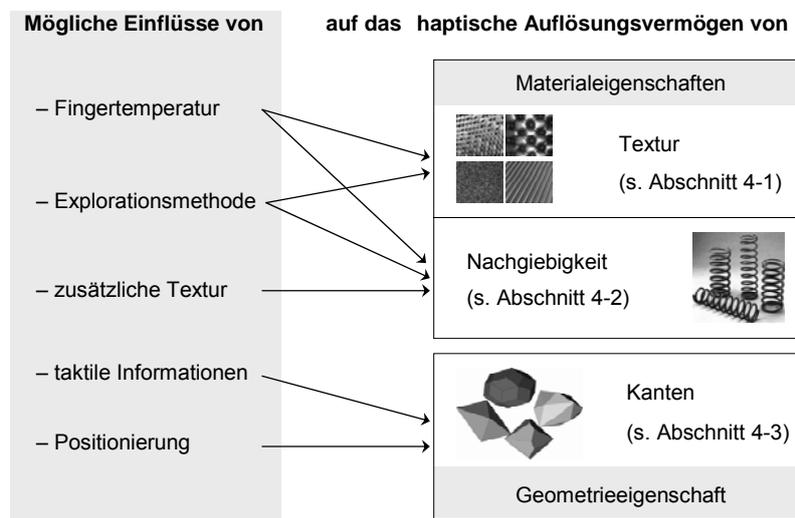


Abb. 1-3 Die in Teil 1 adressierten möglichen Einflussfaktoren auf das haptische Auflösungsvermögen spezifischer Objekteigenschaften.

Teil 2 – Intrahaptische Integration: Darbietung zusätzlicher Information

Wie beeinflussen sich gleichzeitig dargebotene Objekteigenschaften gegenseitig in ihrer Empfindungsstärke?

Wahrnehmung ist mehr als eine Abfolge physiologischer Schritte von der Reizaufnahme über Rezeptoren, der Weiterleitung über Nervenfasern bis hin zur kortikalen Verarbeitung (s. Abschnitte 2-1 bis 2-5). Sie geht über eine reine Datenkombinierung hinaus (bottom-up) und ist ein konstruktiver Prozess (für einen Überblick s. Goldstein, 2002; Anderson, 1996; Lindsay & Norman, 1977), der sich überall dort bemerkbar macht, wo eine Reizpräsentation nicht zur reizspezifischen Reaktion führt. Dann nämlich können konzeptgebundene (top-down) Prozesse identifiziert werden, die zeigen, dass beispielsweise der Reizkontext wahrnehmungsorganisierend wirkt. Das zusätzliche Darbieten anderer Objekteigenschaften beeinflusst damit nicht nur ihre Unterscheidbarkeit, sondern auch ihre kontextuelle Wahrnehmung. Beispielsweise erscheint der Kreis im Zentrum in Abbildung 1-4 abhängig von der ihn umgebenden Reizkonfiguration unterschiedlich groß, obwohl er de facto in beiden Kontexten gleich groß ist. Daneben kann auch Vorwissen oder Erfahrung die Wahrnehmung verzerren. So konnte die Forschung z.B. nachweisen, dass Objekte des gleichen Gewichts leichter geschätzt werden, wenn ihr Volumen größer ist (vgl. Ellis & Lederman, 1999, 1998, 1993).

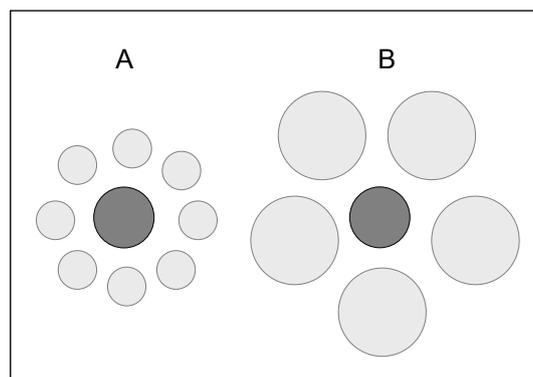


Abb. 1-4 Größentäuschung: Der Kreis in der Mitte wirkt in Kontext A größer als in Kontext B.

Da bisherige Untersuchungen zum Zusammenwirken realer Eigenschaften, d.h. Objektnachgiebigkeit, -temperatur und -textur, bis dato unvollständig sind, auch wenn sich eine gegenseitige Beeinflussung dieser Objekteigenschaften andeutet, soll hier ihre systematische Variation nähere Aussagen über mögliche intrahaptische Illusionen liefern. Dazu wird in Abschnitt 5-1 untersucht, wie unterschiedliche Objekteigenschaften an einem Finger integriert werden und welche intrahaptischen Illusionen auftreten können.

Wie verändert eine Erhöhung der haptischen Informationsmenge bei der Darstellung von Oberflächenneigung deren Wahrnehmung?

Haptische Informationen können allerdings auch über mehr als einen Finger integriert werden und die Wahrnehmung einer komplexeren Objekteigenschaft wie z.B. der Form erlauben (z.B. Pont, Kappers & Koenderink, 1999). Gerade Mensch-Maschine-Schnittstellen, die Informationen verteilt an mehrere Finger darbieten, setzen diese menschliche Fähigkeit voraus (z.B. Kammermeier, Kron, Hoogen & Schmidt, 2004). Wie Informationen über mehrere Finger integriert werden sowie die Bedeutung redundanter Darstellung von Informationen, wird in Abschnitt 5-2 adressiert. In der Forschung wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der modalitätsspezifischen Informationsmenge auch die Wirklichkeitsnähe bzw. das Präsenzempfinden erhöht, wie bereits angedeutet wurde. Menschen können redundant darge-

botene Informationen nutzen, um verlorene Daten zu rekonstruieren oder ambivalente zu deuten. Daher wird in dieser Arbeit auch der Einfluss zusätzlicher (redundanter) intrahaptischer Rückmeldung auf die Wahrnehmung am Beispiel der Oberflächenneigung bei verteilter Darbietung über ein HSI untersucht (s. Abschnitt 5-2).

Teil 3 – Intermodale Integration: Integrationsgrenzen und sensorische Dominanz

Führt bimodale gegenüber unimodaler Darbietung zu einem überlegenen menschlichen Auflösungsvermögen der physikalischen Parameter?

Dominiert eine (evtl. die visuelle) Modalität die bimodale Wahrnehmung?

Wo liegt die Grenze zwischen perzeptueller Kongruenz und detektierbarem intermodalem Konflikt bei bimodaler Wahrnehmung?

Der psychophysisch motivierte Ansatz zur Datenreduktion wurde nach Kenntnis des Autors in der Forschung bisher v.a. getrennt für die Reduktion visueller, auditiver oder haptischer Datenströme angewandt. In Mensch-Roboter-Systemen werden jedoch Informationen aus mehr als einer Modalität rückgemeldet; besonders Lösungsansätze, die echtzeitfähige multimodale Interaktion erlauben, stellen diesbezüglich eine Herausforderung dar.

Menschen nehmen eine begrenzte Bandbreite physikalischer Reize wahr (s. Teil 1), und sie werden außerdem beeinflusst von zusätzlicher Reizdarbietung (s. Teil 2). Zudem können sie auch Verzerrungen und Asynchronizität zwischen den Sinnen kompensieren. Multimodale Informationen, die einer Quelle zugewiesen werden können, werden in der menschlichen Wahrnehmung integriert. Da Menschen in der Regel ein konsistentes Bild ihrer Umwelt erwarten (für einen Überblick s. Stein & Meredith, 1993), werden Informationen auch dann integriert, wenn sie physikalisch inkongruent sind. Daher können, – ähnlich wie eine Aktualisierung der Information davon abhängig gemacht wird, ob sie einen prozentualen Wert (wie z.B. JND-%) überschreitet, zeitliche Abweichungen oder Abweichungen in der Amplitude zwischen den Modalitäten zugelassen werden, solange sie unterhalb der 50%-Schwelle (d.h. der Unterschiedsschwelle) liegen.

Wird der Informationsgehalt einer Modalität systematisch reduziert (oder verrauscht), verringert sich auch die relative Wichtigkeit dieser verlustbehafteten Modalität, während die Gesamtwahrnehmung hauptsächlich von der unverzerrten Modalität dominiert wird (vgl. Ernst & Banks, 2002). Dies kann auch bei intermodalen Latenzen auftreten und teilweise zu einem Ignorieren der unzuverlässigeren Modalität führen (z.B. Wermuth, 1998).

Aus Befunden der Integrationsforschung geht darüber hinaus hervor, dass häufig grundsätzlich eine Modalität die andere dominiert, demzufolge stärker in der Gesamtwahrnehmung gewichtet ist (vgl. Kapitel 6).

Die Kenntnis der Integrationsgrenzen und das Wissen um sensorische Dominanz erlauben daher wichtige Aussagen darüber, ob, damit der Benutzer die Informationen aus einem Sinneskanal nicht vollständig ignoriert, tatsächlich eine ausbalancierte Qualität modalitätsspezifischer Feedbacks nötig ist. Diese Fragestellung wird daher in Kapitel 7 eingehend behandelt. Da bei Untersuchungen, die die Teleaktion mit einschließen, aufgrund erhöhter Netzlast Verzögerungen und Datenverluste auftreten können und sich somit keine für Probanden vergleichbare, reproduzierbare Versuchsbedingungen herstellen lassen, wurde diese grundlegende Fragestellung für diese Arbeit in einer computergenerierten Umgebung untersucht.

Grenzen visuell-haptisch kompensierbarer Abweichungen werden dabei an den Beispielen Objektnachgiebigkeit (s. Abschnitt 7-1) sowie Objektkanten (s. Abschnitt 7-2) bestimmt. Der modalitätsspezifische Einfluss auf die Detektierbarkeit bimodaler Inkongruenzen wird darüber hinaus adressiert.

Teil 4 – Bimodale Inkongruenzen: Wahrnehmung und Einfluss auf die Performanz

Beeinflussen Abweichungen in der visuell-haptischen Darstellung Präsenzerleben und Aufgabenleistung in Abhängigkeit der Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz?

Die Forschung zeigte, dass wenn multimodale Informationen als von *einer* Quelle kommend wahrgenommen werden können, selbst hohe Inkongruenzen kompensiert werden (z.B. Marks, 2004). Bimodal inkongruente Informationen werden dabei so integriert, dass die resultierende Wahrnehmung (je nach Modalitätseinfluss) eine gewichtete Summe der Wahrnehmung der Einzelmodalitäten ergibt (s. Kapitel 6, 7).

Inwiefern jedoch eine inkongruente bimodale Darstellung eines Objekts seine Bewertung beeinflusst oder ob sie sich auf die Performanz und das Präsenzempfinden auswirkt, solange die bimodalen Inkongruenzen nicht detektierbar sind, ist bisher noch nicht geklärt. Der Einfluss von kongruenter, perzeptuell kongruenter sowie perzeptuell inkongruenter visuell-haptischer Information auf insbesondere das Präsenzempfinden wird deshalb an den Beispielen Objektnachgiebigkeit sowie Objektkante untersucht (s. Kapitel 8), um so eine erste Antwort auf diese Frage geben zu können.

Die Schlussfolgerungen aus den dazu vorgenommenen Experimenten werden jeweils am Ende der Kapitel zusammengefasst.

2 DAS SOMATOSENSORISCHE SYSTEM

“Workers in somesthesia have often complained of the difficulty of conveying to others the importance of the sense of touch and position. For vision and audition, one can imagine being deprived of sight or hearing, and there are, of course, blind and profoundly deaf individuals who can help us understand the nature of their experience. A head cold lets us know the information derived from olfaction, but what would it be like to be without somesthesia?”

(Craig & Rollman, 1999, p. 306)

Bei der Gestaltung von TPTA-Systemen gilt es grundsätzlich, biologische und psychologische Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung zu berücksichtigen. Daher sollen diese im Folgenden kurz zusammengefasst werden; eine ausführliche Darstellung dieses umfassenden Themengebietes kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden. Dafür sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (wie z.B. Klatzky & Lederman, 2003a; Johnson, 2002; Schmidt & Schaible, 2001; Geldard, 1972; Clark & Horch, 1986).

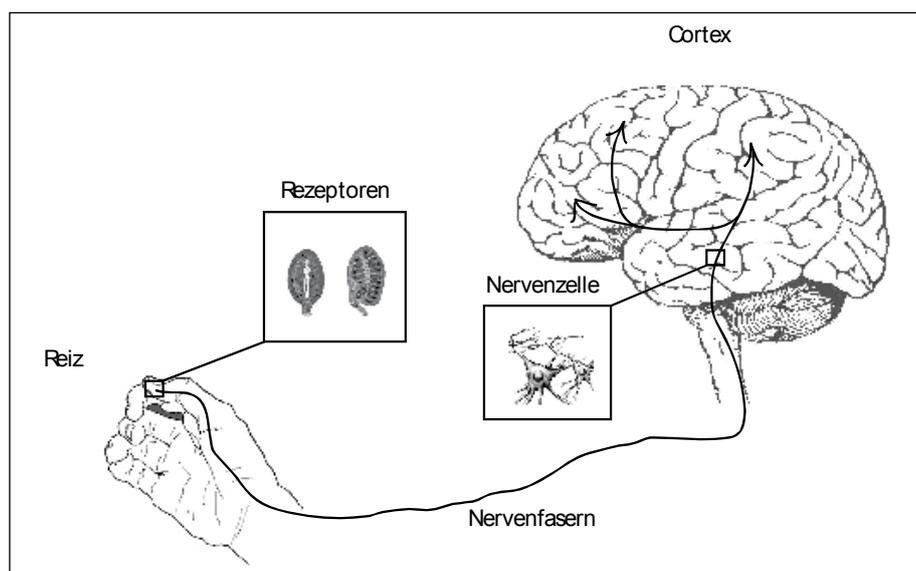


Abb. 2-1 Reizaufnahme durch modalitäts- und reizspezifische Rezeptoren. Informationsweiterleitung über Nervenfasern an das ZNS. Verschaltung zu und Verarbeitung in kortikalen modalitätsspezifischen und assoziativen kortikalen Zentren.

Der Mensch nimmt seine Umgebung mit seinen Sinnen wahr, zu denen Sehen, Hören, Fühlen, Riechen, Schmecken, etc. zählen. Unter *Sinn* wird im Allgemeinen nicht nur das Information aufnehmende Sinnesorgan, sondern in der Regel außerdem die sensorisch einheitliche Gesamtempfindung verstanden. Während diese Definition für den Sehsinn, dessen rezeptives Organ das Auge ist, sowie für den Hörsinn, dessen rezeptives Organ das Ohr ist, leicht nachvollziehbar ist, können für den Sinn „Fühlen“ drei rezeptive Organe unterschieden werden: Die Haut, der Körper und die Extremitäten, d.h. Gelenke, Muskeln, sowie das Vestibularorgan. Da dem Fühlen mehr als nur ein Sinnesorgan zugeordnet werden kann und jedes eine Vielfalt unterschiedlicher Sinneseindrücke vermittelt, wird beim „Fühlsinn“ inzwischen von mehreren (Teil-) Sinnen gesprochen (z.B. Cholewiak & Collins, 1991). Es wird

zwischen Haut-, Stellungs- und Gleichgewichtssinn unterschieden; oft wird auch der Temperatursinn als weiterer Sinn hinzugerechnet.

Die Wahrnehmung, d.h. Aufnahme, Weiterleitung und Verarbeitung von Informationen aus der Haut, über die Stellung und Bewegung der Gliedmaßen sowie der Kraftaufwendung erfolgt durch das somatosensorische System (s. Abbildung 2-1). Es kann untergliedert werden in das haptische und in das propriozeptive System, auch als kinästhetisches System bezeichnet. Das *haptische* Subsystem (*griech.* *haptikos*, greifbar) nimmt sowohl *taktile*, d.h. durch Rezeptoren in der Haut bei direkter Berührung medierte, als auch *propriozeptive* Informationen aus Stellung und Bewegung der Gliedmaßen auf (nach Loomis & Lederman, 1986).

Sensorische Reize aus der Umwelt werden durch spezialisierte Rezeptoren der einzelnen Sinnesorgane aufgenommen (s. a. Abbildung 2-1). Diese menschlichen „Sensoren“ sind modalitätsspezifisch und kodieren unterschiedliche physikalische Parameter.

Modalität bezeichnet die Art der durch ein Sinnesorgan mediierten *Empfindung* und umschließt demzufolge eine Gruppe ähnlicher Sinneseindrücke (vgl. Dudel, 1973). Eine Modalität kann dabei in seine Qualitäten untergliedert werden (die sog. Submodalitäten), wobei der Kodierung einer *Submodalität* oft ein spezialisierter Rezeptortyp zugeordnet werden kann: Beispielsweise können in der Retina die Zapfen Farben, die Stäbchen Helligkeit kodieren.

Im taktilen System müssen thermische, mechanische und Schmerz kodierende Modalitäten unterschieden werden: Die Art der Einzelempfindungen (*Sinneseindrücke*, d.h. die kleinste Einheit der Sinneserfahrung), die durch adäquate Reizung eines spezifischen Rezeptortyps erzeugt wird, definiert auch die unterschiedlichen Qualitäten der Thermo-, Mechano- oder Nozizeption. So können, z.B. innerhalb der Gruppe mechanischer Stimuli, Druck, nieder- und hochfrequente Vibrationen und Scherkräfte als Qualitäten unterschieden werden, die wiederum von spezialisierten Rezeptortypen (s. Abschnitt 2-1-1) aufgenommen werden können. Eine derartige Untergliederung der haptischen Modalität wird jedoch in der Forschung selten vorgenommen.

Reizverarbeitung im somatosensorischen System. Informationen im haptischen System werden durch aktives Untersuchen, Manipulieren und Interagieren mit der Umgebung gewonnen. Es können dabei typisierte sog. Explorationsbewegungen unterschieden werden; diese werden in Abschnitt 2-3 beschrieben.

Mithilfe aktiver Exploration werden nicht nur Informationen über Armbewegung, Kraftaufwendung oder Fingerposition, sondern auch Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit, wie Textur, Temperatur o. ä., durch spezialisierte Sensoren (Rezeptoren) aufgenommen und in bioelektrische Signale umgewandelt. Wie in Abbildung 2-1 dargestellt, werden die aufgenommenen Reizinformationen dabei über Nervenfasern an das zentrale Nervensystem (ZNS) geleitet. Die einzelnen Rezeptorgruppen und ihre adäquaten Reize, sowie in welchen Kortexarealen die unterschiedlichen haptischen Signale verarbeitet werden, so dass eine bildhafte Repräsentation der Umgebung (bzw. eine Empfindung) entsteht, wird in den Abschnitten 2-1 und 2-2 genauer erläutert.

Haptische Wahrnehmung. Die Wahrnehmung taktiler oder propriozeptiver Reize ist komplexer als eine einfache Reiz-Reaktionskette. Wie in Kapitel 1 bereits angedeutet, können die Rezeptoren nicht alle physikalischen Reizabstufungen auflösen. Darüber hinaus werden im Kortex Informationen kombiniert und mit Erfahrungen abgeglichen. Wahrnehmung geht damit grundsätzlich über eine reine Reizkombinierung hinaus.

Mit den in Kapitel 3 dargestellten Methoden der Psychophysik kann dabei untersucht werden, welche Empfindung beispielsweise durch Druck-, Vibrations- oder Temperaturreize her-

vorgerufen wird und wie hoch das menschliche Auflösungsvermögen ist. Da bei der Manipulation oder Exploration von Objekten und deren Oberflächenstrukturen oft mehr als eine spezifische Rezeptorart angesprochen wird, ist der diskutierte Reiz-Reaktions-Zusammenhang bei komplexeren Reizen konsequenterweise ebenfalls komplizierter. Der für diese Arbeit relevante Forschungsstand zur Wahrnehmung von Textur wird daher in Abschnitt 2-4 ausführlich vorgestellt, Wahrnehmung von Temperatur in Abschnitt 2-5 und in Abschnitt 2-6 die durch das propriozeptive System vermittelte Wahrnehmung von Bewegung, Position und Kraft.

2-1 Reizaufnahme

Das taktile System vermittelt Informationen durch direkten Kontakt mit einem Objekt bzw. mit der Umwelt. Um diese aufzunehmen, enthält die menschliche Haut unterschiedliche Rezeptortypen (s. Abschnitt 2-1-1): *Mechanorezeptoren* sind Sensoren für Druck, Hautdeformation, Bewegung und Vibration, *Thermorezeptoren* für Temperaturänderung. Bewegung, Position der Gliedmaßen und beispielsweise beim Greifen auftretende Kräfte werden durch entsprechende Sensoren in den Muskeln und Gelenken detektiert (s. Abschnitt 2-1-2). Diese Sinneszellen sind demzufolge für das Entstehen von Empfindungen verantwortlich: Ihre physiologischen Eigenschaften determinieren, welche physikalischen Reizparameter in welchem Ausmaß aufgenommen und weitergeleitet werden.

2-1-1 Das taktile System

2-1-1-1 *Mechanorezeptoren*

Druck- und Vibrationsreize werden durch in der Dermis liegende Sensoren des Tastsinns aufgenommen und weitergeleitet (s. Abbildung 2-2). Vier verschiedene Mechanorezeptoren können in der unbehaarten Haut unterschieden werden: Die Merkel-Zellen, die Ruffini-Endkörperchen, die Pacini- und Meissner-Körperchen (für einen Überblick s. z.B. Johnson, 2002; Seow, 1988; Darian-Smith, 1984a; Schmidt & Thews, 1983; Geldard, 1972). Auch in der behaarten Haut lassen sich diese Rezeptortypen nachweisen (z.B. Johnson, 2002; Greenspan & Bolanowski, 1996; Bolanowski, Gescheider, Verrillo & Checkosky, 1988).

Daneben reagieren einige der Mechanorezeptoren jedoch zusätzlich auf Reizparameter, auf deren Detektion andere Sensoren spezialisiert sind: Beispielsweise sind sie zusätzlich sensitiv für Temperatur (z.B. Cholewiak & Collins, 1991). Da dies die Wahrnehmung entscheidend beeinflussen kann, wird der derzeitige Forschungsstand kurz in Abschnitt 2-1-1-3 zusammengefasst.

Die Literatur unterscheidet zwischen drucksensitiven und geschwindigkeitssensitiven Rezeptortypen (z.B. Geldard, 1940): Während Merkel-Zellen und Ruffini-Körperchen langsam adaptieren und damit statischen Druck detektieren können, kodieren Meissner- und Pacini-Körperchen rasche Veränderungen bzw. Vibrationen unterschiedlicher Frequenzbereiche (vgl. Johnson, Hsiao & Yoshioka, 2002; Greenspan & Bolanowski, 1996; Bolanowski et al., 1988). Im Folgenden werden die Hauptmerkmale der vier Mechanorezeptoren kurz skizziert. Weitere Charakteristika können der Tabelle 2-1 entnommen werden.

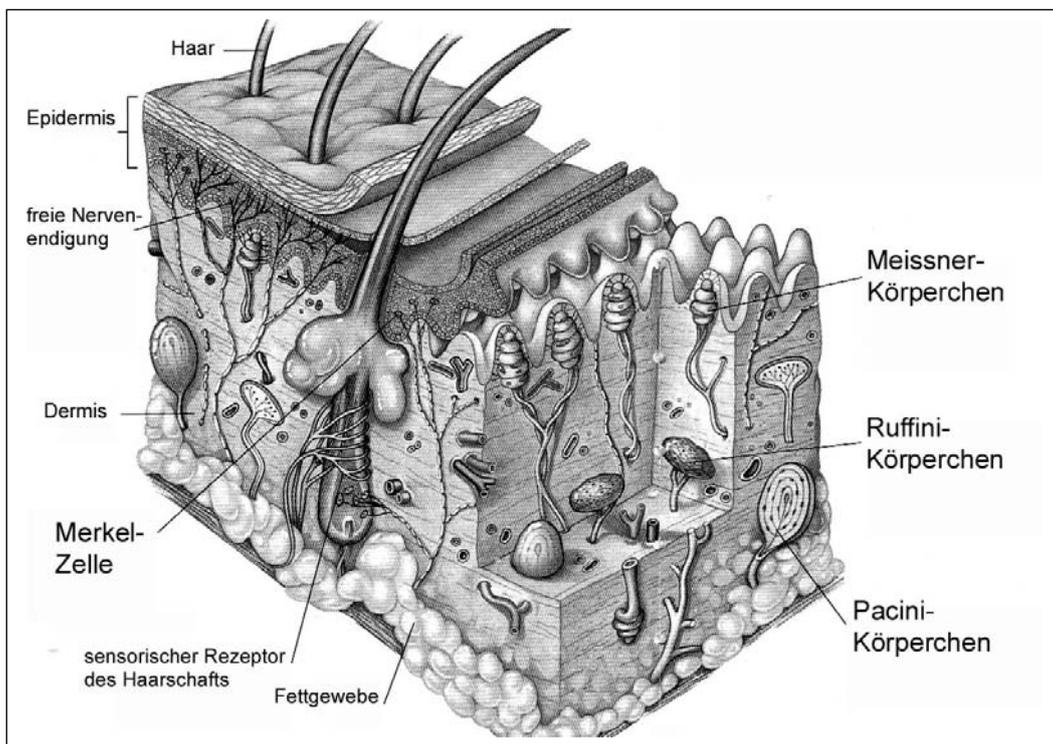


Abb. 2-2 Querschnitt durch die Haut mit den wichtigsten Rezeptortypen.

Merkel-Zellen sind scheibenförmig; sie treten sowohl in der behaarten (dann als Tastscheiben bezeichnet) als auch in der unbehaarten Haut auf und sind in kleinen Gruppen nahe der Dermis in der untersten Schicht der Epidermis angesiedelt. Sie sind sensitiv für Texturen und Form, detektieren Intensitäten und werden demzufolge auch Druckrezeptoren genannt (z.B. Johnson, Hsiao & Yoshioka, 2002; Greenspan & Bolanowski, 1996; Johnson, Phillips, Hsiao & Bankman, 1989; Bolanowski et al., 1988).

Ruffini-Körperchen sind neben den Merkel-Zellen die zweite Gruppe langsam adaptierender Rezeptoren; sie bestehen aus einer spindelförmigen Struktur, die von einer Kapsel umschlossen ist, und liegen im subkutanen Gewebe. Optimale Reize sind beispielsweise seitliche (laterale) Bewegung oder Hautdehnung: Beides tritt z.B. auf, wenn ein schweres Objekt aus der Hand zu Rutschen droht. Im Allgemeinen ist jedoch relativ wenig über Lage, Struktur sowie exakte Charakteristika der Ruffini-Körperchen bekannt (z.B. Johnson et al., 2002). Über den exakten Frequenzbereich, in dem sie sensitiv sind, besteht noch Forschungsbedarf; er wird zwischen 0-400 Hz angegeben (z.B. Greenspan & Bolanowski, 1996; Cholewiak & Collins, 1991; Bolanowski et al., 1988). Im Allgemeinen ist der Beitrag der Ruffini-Körperchen an der Wahrnehmung von Vibrationen zweitrangig, und kann auch hier unberücksichtigt bleiben.

Meissner-Körperchen sind verantwortlich für die Greifkontrolle, detektieren Oberflächenstruktur und niederfrequente Vibrationen, und werden, da sie v.a. in der Übergangsphase beim Eindringen eines Körpers oder beim Kontakt reagieren, auch als Bewegungsdetektoren bezeichnet (z.B. Johnson et al., 2002; Srinivasan, Whitehouse & LaMotte, 1990; Greenspan & Bolanowski, 1996; Bolanowski et al., 1988). Im Gegensatz zu den Merkel-Zellen zeigen sie jedoch geringere taktile Genauigkeit (s. Johnson et al., 2002; Johnson et al., 1989; Valbo & Johansson, 1984). Die Meissner-Körperchen bestehen aus eingekapselten, spiralförmig angeordneten flachen Nervenendigungen und liegen dicht unter der Epidermis.

Pacini-Körperchen sind zwiebförmige Kapseln, die wie die Ruffini-Körperchen tief in der Dermis liegen. Sie können Frequenzen zwischen 10 bis ca. 10.000 Hz (vgl. Geldard, 1940) detektieren. Aufgrund ihrer schnellen Adaptationsrate sind sie insensitiv für statisch aufgetragenen Druck (z.B. Johnson et al., 2002, Greenspan & Bolanowski, 1996; Bolanowski et al., 1988).

Tabelle 2-1 Zusammenfassung: Charakteristika der vier wichtigsten Mechanorezeptoren.

	Merkel-Zellen	Ruffini-Körperchen	Meissner-Körperchen	Pacini-Körperchen
<i>adäquate Stimuli</i>	Druck, Gewebebeanspruchung, Form, Intensität	laterale Bewegung, Hautdehnung	niederfrequente Vibration, Bewegung, Geschwindigkeit	hochfrequente Vibration, Bewegung, Beschleunigung
<i>Frequenzspektrum</i>	0.3-80 Hz	unbekannt	3-100 Hz	>10 Hz
<i>optimale Frequenz</i>	5 Hz	unbekannt	50-100 Hz	200-300 Hz
<i>Absolutschwelle für Eindringtiefe</i>	30 µm (Johnson, 2002), 8 µm (LaMotte & Srinivasan, 1989)	300 µm	6-8 µm	0.81 µm (Johnson, 2002), 21 µm (LaMotte & Srinivasan, 1989)
<i>Absolutschwelle für Druck</i>	0.08-0.20 µN	0.10-0.25 µN	–	–
<i>räumliches Auflösungsvermögen</i>	0.5-1 mm	3-5 mm	> 1.5 mm	wegen tiefer Lage gering
<i>Adaptationsrate</i>	langsam	langsam	schnell	schnell
<i>Rezeptordichte Fingerkuppe</i>	100/cm ²	10/cm ²	150/cm ²	20/cm ²
<i>rezeptives Feld: Größe / Grenze</i>	klein / klar definiert	groß / unklar	klein / klar definiert	groß / unklar

2-1-1-2 Thermorezeptoren

Neben Mechanorezeptoren existieren in der Haut temperatursensitive Sensoren, die als freie unspezifische Nervenendigungen bzw. Fasern beschrieben werden (für einen Überblick s. Sherrick & Cholewiak, 1986; Darian-Smith, 1984b; Schmidt & Thews, 1983; Geldard, 1972; Kenshalo, 1971).

Die Thermorezeptoren werden untergliedert in Wärme- und Kälterezeptoren. Erstere sind sensitiv für Temperaturen zwischen 30-48°C mit einem Optimum der Empfindlichkeit bei 40-44°C, während Kälterezeptoren auf Temperaturen zwischen 10-45°C reagieren (mit einem Optimum bei 25-30°C). Einige Kältesensoren senden auch bei Temperaturen zwischen 45-50°C Signale an das Gehirn, was zu paradoxen Kälteempfindungen bei hohen Temperaturen führen kann, weil Hitze somit auch als kalt empfunden wird. Auf Temperaturen im Indifferenzbereich, d.h. im Temperaturbereich „normaler“ Hauttemperatur (31-35°C), reagieren sowohl Wärme- als auch Kälterezeptoren. Darüber hinaus detektieren Thermorezeptoren nicht nur statische, d.h. konstante, sondern auch auf veränderliche, d.h. dynamische, Temperaturdarbietung (z.B. Spray, 1986; Hensel, 1968; Hensel & Zotterman, 1951).

Statische Temperatur. Wird konstante Temperatur dargeboten, werden die thermischen Reize konstant detektiert und zur Weiterverarbeitung über spezifische Nervenfasern weitergeleitet; diese wiederum zeigen ein konstantes Feuerungsverhalten (z.B. Hensel, 1968; Spray, 1986). Ein Unterschied zwischen den Feuerungsraten der Wärme- und Kältefasern

findet sich bei statischer Temperaturdarbietung: Während Wärmefasern regelmäßig feuern, zeigen Kältefasern Feuerungsimpulse nur in einem Temperaturbereich von 20-30°C.

Dynamisch wechselnde Temperatur. Hensel & Zotterman (1951) zeigten, dass Kältefasern auf eine Veränderung der Temperatur mit einer entsprechenden Veränderung ihrer Feuerungsrate reagieren. Kälterezeptoren (bzw. Wärmerezeptoren) zeigen „(a) a frequency rise (fall) of the afferent discharge on sudden cooling; (b) no response on sudden warming (cooling)“ (Hensel, 1968, p. 396), aber keinerlei Reaktion auf mechanische Reize (z.B. Hensel, 1968). In der Regel ist die hervorgerufene Feuerungsrate bei Änderung der Temperatur wesentlich höher als bei statischer Exposition, und die Unterscheidbarkeit thermischer Reize variiert wiederum in Abhängigkeit mit der adaptierten Temperatur (z.B. Hensel & Huopaniemi, 1969). Bei rascher Veränderung in der Hauttemperatur, z.B. bei Kontakt mit einem kalt oder warm temperierten Objekt, zeigen die Wärmefasern ein recht einheitliches Verhalten, das nach Darian-Smith (1984b) u.a. folgendermaßen charakterisiert ist: 1) Während der ersten 1.5-4 Sekunden nach Präsentationsbeginn erfolgt ein rascher Anstieg der Feuerungsrate, der in den folgenden 5-12 Sekunden wieder fast exponentiell abnimmt und 2) es zeigt sich eine enge Beziehung zwischen Feuerungsrate und Intensität der Wärmeimpulse. Kältefasern hingegen weisen einen kürzeren Anstieg (1-2 Sekunden nach Beginn) und einen rascheren zeitlichen Verfall der Feuerungsraten über ca. 1.5-3 Sekunden auf.

Wärme- und Kälterezeptoren unterscheiden sich darüber hinaus auch in ihrer Schnelligkeit der **Reizweiterleitung**: Wärmereize werden mit einer Geschwindigkeit von ca. 0.5-1.2 m/sec (z.B. Darian-Smith, 1984b; Hensel, 1976) und Kältereize mit einer Geschwindigkeit von ca. 14.5 m/sec übertragen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass Wärmefasern unmyelinisiert (daher langsamere Reizweiterleitung) und Kältefasern myelinisiert sind¹.

2-1-1-3 *Thermorezeptoren und Mechanorezeptoren*

Wie bereits erwähnt, sind einige Mechanorezeptoren temperatursensitiv. Die Forschung konnte allerdings zeigen, dass der Beitrag der Mechanorezeptoren zur Empfindung von Temperatur als eher gering einzuschätzen ist (vgl. Cholewiak & Collins, 1991; Spray, 1986; Konietzny & Hensel, 1979; Kenshalo, 1971): Eine thermische Stimulation der Mechanorezeptoren führt nämlich zu keiner Wärme- oder Kälteempfindung (z.B. Konietzny, 1984). Zu den diskutierten Mechanorezeptoren mit thermischer Reaktionsfähigkeit zählen die Merkel-Zellen, Ruffini- und die Pacini-Körperchen.

Merkel-Zellen. Konietzny & Hensel (1979) konnten zeigen, dass Merkel-Zellen auf Wärmereize gar nicht reagieren. Einzig für konstant kühle Temperaturen (12-27°C) und einer Kontaktkraft von 0.5 N (1 mm² Kontaktfläche) konnten für Merkel-Zellen niedrige Feuerungsraten nachgewiesen werden, die dann bei Temperaturen zwischen 32-37°C noch anstiegen. Der Einfluss starker Temperaturänderung (Wechsel von 10 auf 20°C) auf die Feuerungsraten der Merkel-Zellen war dabei bedeutend größer als bei konstanter kalter Stimulation (z.B. Ko-

¹ Es existieren auch myelinisierte Wärme- und unmyelinisierte Kältefasern, die sich jedoch in ihrem Verhalten auf Wärme- bzw. Kältereize unterscheiden (z.B. Spray, 1986): Beispielsweise zeigen unmyelinisierte Kältefasern eine reduzierte Reizübertragungsgeschwindigkeit, weisen eine höhere Schwelle für Kältereize auf und reagieren bei Kälte zwischen ca. 14-23°C mit einer dysästhetischen Empfindung (z.B. Spray, 1986; Fruhstorfer, 1984; Fruhstorfer, Zenz, Nolte & Hensel, 1974). Fruhstorfer, Harju & Lindblom (2003) zeigten, dass die unmyelinisierten Kältefasern zur Empfindung der synthetischen Hitze beitragen. Synthetische Hitze entsteht bei gleichzeitiger Stimulation durch warme und kalte Reize. Eine Empfindung extremer Hitze bzw. Hitzeschmerz wird induziert (s. Craig & Bushnell, 1994); das Phänomen ist auch unter dem Namen „thermal grill-effect“ (Graceley, Farrell & Grant, 2002, p. 623) bekannt.

nietzny, 1984). Merkel-Zellen zeigen demzufolge ein den Thermorezeptoren, gerade den Kältefasern, sehr ähnliches Verhalten (z.B. Spray, 1986).

Dem entgegengesetzt zeigten einige **Ruffini-Körperchen** reduzierte Feuerungsraten bei Erwärmung (34-43°C), die bis hin zur vollständigen Unterdrückung ihrer Spontanaktivität reichen konnte, und erhöhte Feuerungsraten bei Kühlung (22-17°C), wenn sie über ein Temperaturdisplay mit einer Kontaktfläche von 5 mm² bei konstanter Kraftaufbringung von 0.2 N stimuliert wurden (z.B. Konietzny, 1984; Konietzny & Hensel, 1979). Dabei wiesen die Ruffini-Körperchen „sogar eine größere Erhöhung ihrer Aktivität während der dynamischen Reaktion auf Kühlung auf als spezifische Kälterezeptoren bei identischer Stimulation“ (Konietzny, 1984, p.29).

Ferner ließ sich in der Forschung nachweisen, dass auch **Pacini-Körperchen** auf Temperatur reagieren, allerdings nur bei gleichzeitiger mechanischer Stimulation (z.B. Ishiko & Löwenstein, 1961; Inman & Peruzzi, 1960). Die Sensitivität für Reizweiterleitung wird bei Temperaturen zwischen 12-40°C kaum, bei Temperaturen unter 17°C jedoch drastisch reduziert (z.B. Ishiko & Löwenstein, 1961; Inman & Peruzzi, 1960). Pacini-Körperchen reagieren somit lediglich auf statische Darbietung von Kältereizen.

2-1-2 Propriozeptives System

Informationen über Stellung, Bewegung sowie Spannung bzw. Kraft der Gliedmaßen werden durch Rezeptoren in den Gelenken und Muskeln, den sog. Propriozeptoren, aufgenommen und kodiert. Es können Muskelspindeln, Golgi-Sehnenorgane, Gelenkrezeptoren sowie Labyrinthrezeptoren unterschieden werden (für einen Überblick s. Goldstein, 1997; Cholewiak & Collins, 1991; Seow, 1988; Schmidt, 1973; Geldard, 1972; Howard & Templeton, 1966). Im Gegensatz zu den taktilen Sensoren scheinen die Propriozeptoren allerdings nicht vollkommen spezialisiert zu sein und eher durch ihre Kombination zur Wahrnehmung von Position, Kraft und Bewegung beizutragen.

Muskelspindeln bestehen aus eingekapselten Muskelfasern und Nervenendigungen und liegen im Muskel parallel zur Muskelfaser. Veränderungen in der Länge und Spannung werden von den Muskelspindeln zwar detektiert, wobei es keine Rolle spielt, ob der Muskel aktiv oder passiv gedehnt wird, sie zeigen aber nur ein geringes Adaptationsverhalten. Dies wiederum ist wichtige Voraussetzung, um Informationen über Position und Bewegung des Körpers aufnehmen zu können.

Im Vergleich zu den Muskelspindeln reagieren die **Golgi-Sehnenorgane** auf Spannungsreize und haben demzufolge einen höheren Schwellwert (z.B. Clark & Horch, 1986): Bei zunehmender Spannung feuern immer mehr Golgi-Rezeptoren und reagieren so bedeutend länger auf die Muskelspannung als die Muskelspindeln. Die Rezeptoren befinden sich in Muskeln und Sehnen und sind eng an Muskelfasern geknüpft. Auf diese Weise erhalten sie Informationen über passive wie aktive Muskelspannung und aktive Muskelkontraktion und tragen so zur Kontrolle des jeweils assoziierten Muskels bei (z.B. Howard & Templeton, 1966).

Gelenkrezeptoren nehmen die Reize wahr, die durch Bewegung, d.h. Beschleunigung und Geschwindigkeit, sowie durch Stellung der Gelenke erzeugt werden. Es können zwei Typen mit ähnlichen Charakteristika unterschieden werden: Rezeptortypen vom Ruffini-Typ oder vom Golgi-Typ. Eine Stimulation erfolgt v.a. durch Druckwechsel, wobei selbst so geringe Veränderungen wie z.B. eine um 2° veränderte Gelenkposition von ihnen detektiert werden können (z.B. Clark & Horch, 1986). Über die Veränderungsrate der Impulsfrequenz wird dabei die Abwinkelungsgeschwindigkeit, über die Amplitude teilweise die Gelenkstellung kodiert. Die Rezeptoren adaptieren dabei bei konstanter Gliedmaßenstellung wenig bzw. gar nicht.

Für die Wahrnehmung der Gelenkstellung sind v.a. die Muskelspindeln und nur in sehr geringerem Maße die Gelenkrezeptoren beteiligt (s. a. Johnson, 2002; Clark, Grigg & Chapin, 1989; Kelso, 1977). Gelenkrezeptoren kodieren daher vermutlich eher Informationen über Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung (vgl. Clark & Horch, 1986).

Die **Labyrinthrezeptoren** tragen zur Wahrnehmung der Körperstellung und Körperbewegung per se bei. Sie befinden sich im Innenohr und reagieren auf Veränderungen, die durch eine Bewegung – unterschiedlicher Geschwindigkeit – auf den Kopf ausgeübt wird.

2-2 Zentrale somatosensorische und sensumotorische Verarbeitung

Um auf haptische Reize reagieren zu können und ehe diese zu einer Empfindung führen, müssen die über taktile und propriozeptive Sensoren aufgenommen Reize vom Nervensystem verarbeitet werden (vgl. Abbildung 2-1). Dazu werden die Fasern, die die Informationen in Form bioelektrischer Signale weiterleiten, mit den peripheren Nerven synaptisch verschaltet. Die peripheren Nerven treten über die Hinterwurzel in das Rückenmark ein, dessen Rückenmarkstränge sich abhängig von ihrer Funktion teilen und durch zwei afferenten Hauptbahnen, dem Hinter- und den Vorderseitenstrang, mit dem Kortex verbunden sind (für einen Überblick s. Schmidt & Schaible, 2001; Pinel, 1997; Cholewiak & Collins, 1991).

Über den Hinterstrang (medial-lemniscales System) werden Informationen über niederschwellige mechanische Reize aus Haut, Muskeln und Gelenken zum primären und sekundären somatosensorischen Kortex weitergeleitet werden. Dieses medial-lemniscale System ist somatotop² organisiert; es bildet die Basis des Tastsinns, erlaubt eine hohe Auflösung räumlicher Details und ist für Stereognosie verantwortlich.

Informationen über Temperatur und Schmerz erreichen über den Vorderseitenstrang (extra-lemniscales System) kortikale Regionen. Es ist in seiner Funktion unspezifisch, nicht oder nur wenig somatotop organisiert und zeigt diffuse Verbindungen zu fast allen Hirnregionen. Aufgabe des extra-lemniscalen Systems ist eher Wahrnehmung von Schmerz, affektive Tönung der Wahrnehmung, Steuerung des Bewusstseins und Orientierungsreaktionen.

Obgleich mechanische (Hinterstrang) und thermische Reizinformationen (Vorderseitenstrang) auf getrennten Bahnen zum Kortex geführt werden, konvergieren sie auf höherer Ebene (vgl. Spray, 1986), denn bevor beide Stränge den Thalamus erreichen, wechseln sie die Körperseite und werden untereinander verschaltet.

² Somatotopie bedeutet, dass die Topographie der Haut sich auch in den weiteren Verarbeitungsebenen fortsetzt und eine Punkt-zu-Punkt-Zuordnung möglich wäre.

Kortex. Die wichtigsten kortikalen Areale, in denen Berührungsinformationen verarbeitet werden, sind in Abbildung 2-3 zusammengefasst: Das primäre (S1) und das sekundäre somatosensorische (S2) Areal. Durch Forschungen über die direkte Stimulation des Kortex konnte das Repräsentationsmuster der Gliedmaßen systematisch kartiert werden. Dabei wurde festgestellt, dass Körperregionen mit stärkerer Innervation, d.h. mit hoher taktiler Genauigkeit, mehr kortikale Fläche beanspruchen (z.B. Burton & Sinclair, 1996): Dies gilt für das Gesicht, den Fuß und die Hand. Die funktionale Organisation kann aber durch extensive Übung beeinflusst werden: Beispielsweise konnte eine Ausdehnung der Fingerrepräsentation bei Pianisten nachgewiesen werden (z.B. Cholewiak & Collins, 1991). Vom primären somatosensorischen Kortex werden die Signale efferent, d.h. vom Kortex Richtung Peripherie, an den sekundären somatosensorischen Kortex weitergeleitet, der bilateral somatotop ist, zum anderen an den Motorkortex zur Bewegungskontrolle, außerdem in die parietalen (seitlich, in Scheitelnähe) Assoziationsfelder. Daneben erfolgt die efferente Steuerung afferenter Bahnen, d.h. von der Peripherie zum Kortex, über Signalweiterleitung in den Thalamus, die Hinterstrangkerne und das Rückenmark.

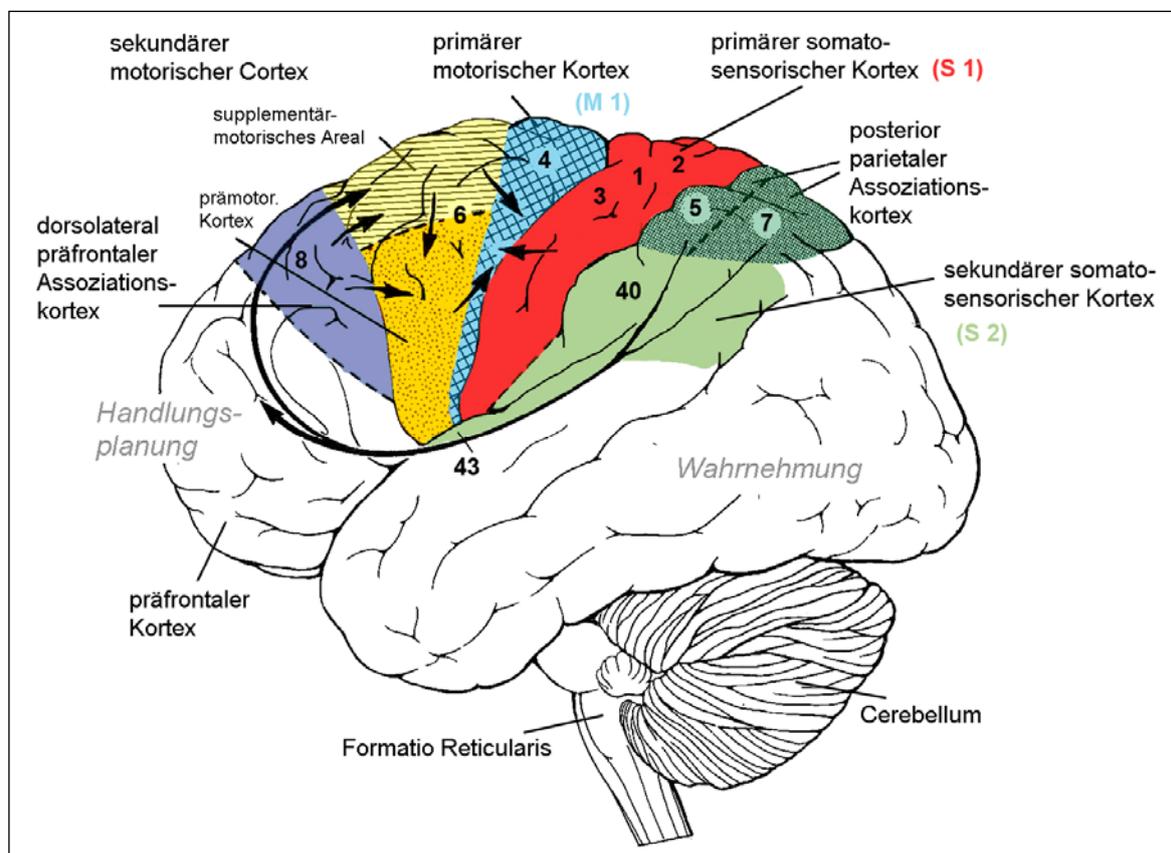


Abb. 2-3 Somatosensorische (Brodmann-Areale 1-3, 40, 43) und sensumotorische Areale (Brodmann-Areale 4, 6, 8). Getrennt durch die Zentralfurche wird den Bereichen Handlungsplanung oder Wahrnehmung als primäre Funktion zugeordnet.

Die enge Verschaltung von somatosensorischem System (Verarbeitung von taktilen und propriozeptiven Reizen) und sensumotorischem System (Planung, Steuerung und Koordination von Bewegung) im Gehirn und Wahrnehmungsprozess erlaubt es dem Menschen, zielgerichtet haptische Informationen über bestimmte Explorationsbewegungen oder durch Manipulation von Objekten zu gewinnen. Die dafür eingesetzten stereotypen Bewegungsmuster werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

2-3 Informationsgewinnung – Explorationsbewegungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde erläutert, wie Informationen über die Sinnesorgane aufgenommen, verarbeitet und mit motorischen Signalen verschaltet werden. Die Koordination des somatosensorischen und sensumotorischen Systems lässt sich beim Manipulieren von Objekten anschaulich verdeutlichen: So werden beim Berühren und Betasten eines Objekts die Rezeptoren in der Haut (Mechano-, Thermosensoren, evtl. Nozizeptoren) stimuliert, zusätzlich die Propriozeptoren bei Positionsänderung und Bewegung der Finger. Wird das Objekt hochgehoben, müssen die Finger koordiniert und – in Abhängigkeit des Objektgewichts und seiner Oberflächenbeschaffenheit – die Greifkraft angepasst werden. Beispielsweise wird eine Erhöhung der Greifkraft nötig, wenn das Objekt aus der Hand zu rutschen droht (z.B. Srinivasan, Whitehouse & LaMotte, 1990).

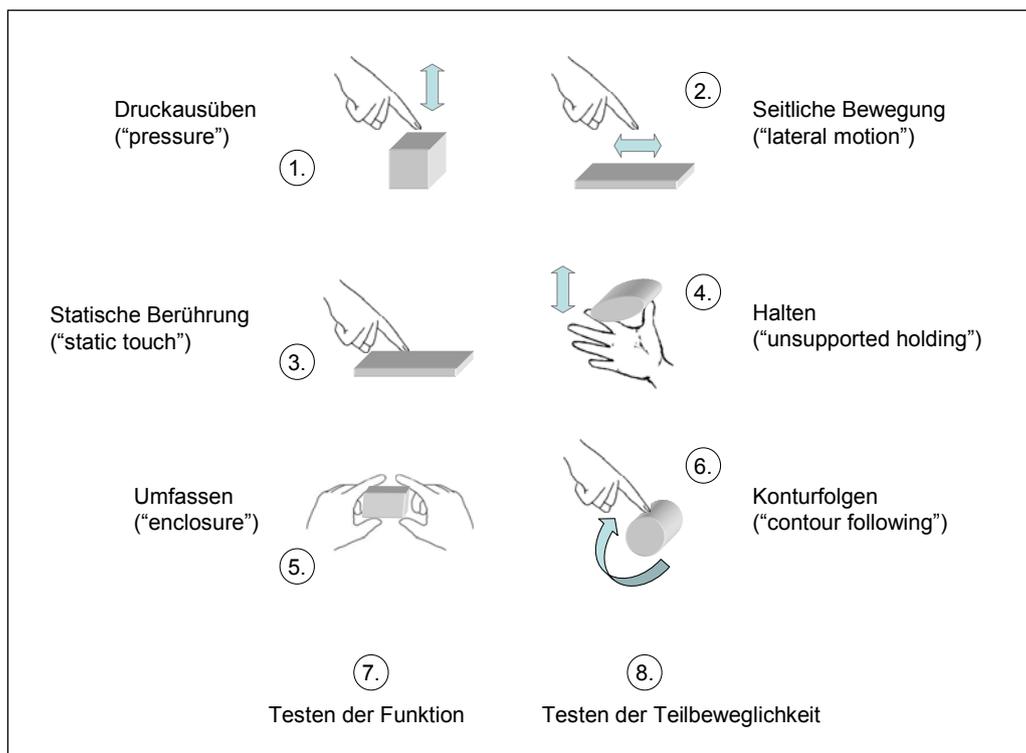


Abb. 2-4 Explorationsbewegungen nach Lederman & Klatzky (1987).

Haptisches Wahrnehmen und Erkennen von Objekten setzt aktive Berührung voraus: Um dreidimensionale Gegenstände oder deren Beschaffenheit zu identifizieren bzw. zu erkennen, sind koordinierte Bewegungsabläufe vonnöten. Lederman & Klatzky (1987) klassifizierten acht unterschiedliche haptische Explorationsprozeduren, die der Mensch konsequent anwendet, um Informationen über Beschaffenheit, Struktur und Funktion von Gegenständen zu gewinnen (s. Abbildung 2-4). Die Auswahl der Explorationsbewegung hängt dabei von der zu untersuchenden Objekteigenschaft ab, wobei Menschen in der Regel vor allem Größe, Form, Textur, Temperatur, Härte und Funktion eines Objektes identifizieren (z.B. Lederman, Klatzky & Reed, 1993; Klatzky, Lederman & Metzger, 1985).

Das Ausnützen dieser Explorationsprozeduren erleichtert die Extraktion spezifischer Objekteigenschaften: Material- (Textur, Härte, Temperatur) und Geometrie-Eigenschaften (Größe, Form), außerdem das Gewicht, welches Lederman und Klatzky den beiden anderen Dimensionen zurechnen. Oberflächenmerkmale wie z.B. die Textur werden dabei v.a. über laterale Bewegung, d.h. ein Streichen über die Oberfläche erforscht, die Härte über das Ausüben von Druck, und Temperatur durch statischen Kontakt.

Ferner unterscheiden sich die Handbewegungen bei Manipulation und Exploration eines Objektes: Während erstere v.a. durch die Stellung der Hand beim Greifen charakterisierbar ist (z.B. Klatzky, Lederman, Pellegrino, Doherty & McCloskey, 1990), lässt sich bei der haptischen Exploration zur Objektidentifikation ein zweistufiges Vorgehen nachweisen (z.B. Klatzky & Lederman, 1992). Auf der ersten Stufe werden multiple Objektmerkmale durch Greifen und Heben grob identifiziert. Unmittelbar während dieses ersten Kontaktes werden bereits zahlreiche Informationen über die Haut aufgenommen (z.B. Klatzky & Lederman, 1995). Dieser „haptic glance“ (Klatzky & Lederman, 1995, p. 1111) ermöglicht es, Materialeigenschaften, wie Textur, Härte und Kälte eines Objektes, innerhalb von bis zu 500 Millisekunden wahrzunehmen (z.B. Lederman & Klatzky, 1997) und parallel zu verarbeiten (z.B. Craig, 1985; Shiffrin, Craig, & Cohen, 1973; Lappin & Foulke, 1973). Auf der zweiten Stufe werden auf Grundlage des ersten Eindrucks spezifische Explorationsbewegungen geplant eingesetzt, um detaillierte Informationen über Objekteigenschaften zu gewinnen (z.B. Lederman, Summers & Klatzky, 1996; Lederman & Klatzky, 1990).

So ist es nicht verwunderlich, dass bei rein haptischer Exploration von Objekten v.a. die Materialeigenschaften im Vordergrund stehen (z.B. Lederman, Summers & Klatzky, 1996; Klatzky, Lederman & Matula, 1993). Bei visuell-haptischer Untersuchung werden dagegen geometrische Eigenschaften stärker gewichtet (Lederman et al., 1996; Klatzky et al., 1993). Reduziert sich dabei die visuelle Identifizierbarkeit, gewinnen die haptischen Explorationsbewegungen wieder stärker an Bedeutung (Klatzky et al., 1991).

2-4 Wahrnehmung von Textur

Um Texturen haptisch zu erfassen, wird (wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben) in der Regel der Finger seitlich über die Oberfläche bewegt. Dabei dringen zum einen die Texturpartikel in die Fingerkuppe ein, zum anderen können Vibrationen zwischen Finger und Textur beim Streichen über die Oberfläche entstehen. Katz (1925) unterschied zwischen Texturen, deren Erhebungen, Partikel oder Strukturen groß genug sind, um vom „Raumsinn“ (ebd. S. 234) wahrgenommen zu werden (Makrotexturen), und Texturen mit Unterschieden in Rauheitsgraden, welche durch den Raumsinn nicht mehr, wohl aber durch den „Vibrationsinn“ (ebd. S. 234) wahrgenommen werden können (Mikrotexturen). Diese Unterscheidung wurde von Hollins & Risner (2000) aufgegriffen und als *Duplex-Theorie taktiler Texturwahrnehmung* (p. 685) überarbeitet.

Die Wahrnehmung von **Makrotexturen** wird durch räumliche Oberflächenmerkmale dominiert und somit über die Deformation der Fingerspitze mediiert (z.B. Bensmaïa & Hollins, 2003; Cascio & Sathian, 2001; Connor & Johnson, 1992; Hollins, Bensmaïa & Washburn, 2001; Johnson & Lamb, 1981; Taylor & Lederman, 1975; Lederman, 1974; Lederman & Taylor, 1972). Die für mechanische Deformation sensitiven Sensoren sind, wie in Abschnitt 2-1-1 erläutert wurde, die Merkel-Zellen (z.B. Greenspan & Bolanowski, 1996; Johnson, 1983; Johnson & Lamb, 1981).

Ein zusätzlicher Einfluss von Vibrationen bei der Wahrnehmung von Makrotexturen wurde in der Forschung bereits diskutiert (vgl. Lederman, Loomis & Williams, 1982). Dabei wurde festgestellt, dass ein Einfluss der Geschwindigkeit der Fingerbewegung auf die Wahrnehmung von Makrotexturen nur sehr gering ist (z.B. Taylor & Lederman, 1975). Auch eine Adaptation an niederfrequente Vibrationen nicht zu einer Veränderung der Makrotexturwahrnehmung (z.B. Hollins et al., 2001). Eine Beteiligung (niederfrequenter) vibrotaktile Information an der Wahrnehmung von Makrotexturen scheint demzufolge eher unbedeutend zu sein.

Wird jedoch mit einem Stift über die Oberfläche gestrichen, werden die Oberflächenmerkmale direkt in Vibrationen umgesetzt, so sind die Menschen auch in der Lage, Aussagen über die Rauheit dieser über einen Stift untersuchten Oberflächen zu treffen (s. Klatzky, Lederman, Hamilton, Grindley & Swendsen, 2003; Klatzky & Lederman, 1999; vgl. auch Katz, 1925).

Mikroturen werden v.a. über vibrotaktile Informationen kodiert (z.B. Bensmaïa & Hollins, 2003; Hollins, Bensmaïa & Roy, 2002; Cascio & Sathian, 2001; Yoshioka, Gibb, Dorsch, Hsiao & Johnson, 2001; Hollins & Risner, 2000; Connor & Johnson, 1992; Loomis & Lederman, 1986; La Motte & Mountcastle, 1975; Lederman & Taylor, 1972). Als Rezeptoren, die auf Mikroturen reagieren, gelten v.a. die Pacini-Körperchen (z.B. Bensmaïa & Hollins, 2003; Hollins et al., 2001; Cascio & Sathian, 2001; Hollins & Risner, 2000; Lederman et al., 1982; Taylor & Lederman, 1975; Lederman, 1974; Lederman & Taylor, 1972). Auch die Meissner-Körperchen scheinen teilweise an der Mikrotexturwahrnehmung beteiligt (s. Bensmaïa & Hollins, 1999).

Bestätigt wurde die primäre Kodierung von Mikroturen über vibrotaktile Informationen durch einige Untersuchungen: Es konnte gezeigt werden, dass die Adaptation der Fingerspitze an Vibrationen über 100 Hz, statische Exploration oder zusätzliche Darbietung von Vibrationen die Wahrnehmung von Mikroturen beeinflusst (s. Hollins et al., 2002; Hollins et al., 2001; Hollins, Fox & Bishop, 2001; Hollins & Risner, 2000; Lederman et al., 1982). Da eine Adaptation an vibrotaktile Frequenzen die subjektive Einschätzung der Rauheit einer Oberfläche nicht beeinträchtigte (z.B. Lederman et al., 1982), jedoch eine Variation der Vibrationsamplitude die Einschätzungen beeinflusste (z.B. Hollins et al., 2001; Hollins, Fox & Bishop, 2001), wird als zugrunde liegender Code mittlerweile weniger eine zeitliche Kodierung angenommen als vielmehr eine Kodierung über die Intensität / Vibrationsstärke (z.B. Bensmaïa & Hollins, 2003; Miyaoka, Mano & Ohka, 1999). Andere Untersuchungen zeigen, dass ergänzend zeitliche, also die vibrotaktile Frequenz betreffende Informationen benötigt werden (z.B. Gamzu & Ahissar, 2001; Van Doren, 1989).

2-5 Wahrnehmung von Temperatur

Menschliches Temperaturempfinden kann untergliedert werden in die „2 Qualitätsdimensionen: Die *Wärmewahrnehmung* und die *Kältewahrnehmung*“ (Hensel, 1952, S. 224). Kälteempfinden setzt für Temperaturen unterhalb 29°C und Wärmeempfinden oberhalb 38°C ein (z.B. Johnson, Darian-Smith & La Motte, 1973). Bei Temperaturen oberhalb von 40-45°C und unterhalb von 15-20°C kommt zusätzlich das Schmerzempfinden hinzu, wobei Kältereize schneller ihre affektive Qualität ändern als Wärmereize (z.B. Greenspan, Roy, Caldwell & Farooq, 2003; Darian-Smith, 1984b; Darian-Smith & Johnson, 1977; Johnson, Darian-Smith & La Motte, 1973). Im Zwischenbereich hängt die Empfindungsqualität der Temperatur v.a. von der adaptierten Hauttemperatur ab (z.B. Kenshalo, 1971).

Temperatur wird als statisch oder dynamisch wahrgenommen (für einen Überblick s. Darian-Smith, 1984b; Kenshalo, 1971; Schmidt & Thews, 1983; Hensel, 1952, 1950). Von statischem Temperaturempfinden wird gesprochen, wenn an eine konstante Temperatur adaptiert wurde. Das Temperaturempfinden bleibt dabei allerdings nicht immer gleich.

Dynamisches Temperaturempfinden wird durch Temperaturänderung ausgelöst. So konnte nachgewiesen werden, dass Menschen sehr sensitiv für thermische Änderungen sind (s. Abschnitt 2-5-1).

Häufig jedoch ist Temperaturempfindung nicht nur an Veränderungen der Außen- oder Körpertemperatur gekoppelt, sondern an Kontakt mit der Umgebung, insbesondere mit einem Objekt. Dabei nimmt der Mensch besonders die Veränderung der Handtemperatur relativ zum berührten Objekt wahr. Es gibt allerdings nur wenige Untersuchungen, die sich mit der Frage der Temperaturwahrnehmung bei Kontakt mit Objekten unterschiedlicher Beschaffenheit beschäftigen, wie es für die vorliegende Arbeit relevant ist (s. Abschnitt 2-5-2).

2-5-1 Statisches und dynamisches Temperaturempfinden

2-5-1-1 Statisches Temperaturempfinden

Adaptation an spezifische Temperaturen kann, abhängig von der Zieltemperatur, bis zu zwanzig Minuten dauern anders als über die Veränderung der Feuerungsraten der Thermozeptoren zu erwarten wäre (z.B. Kenshalo, 1976; Hensel, 1950). Dies kann dazu führen, „dass bei extremen Temperaturen die Temperaturempfindung weit länger dauert als die intracutane Temperaturänderung“ (Hensel, 1950, p.170). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass Temperaturen, wenn die Haut an 37°C oder zwischen 23-27°C adaptiert ist, falsch eingeschätzt werden (z.B. Hensel, 1976).

Im Gegensatz dazu erlischt in der Nähe der Normaltemperatur der Haut (bei ca. 32-34°C) die Temperaturempfindung rascher, auch wenn der Temperatúraustausch noch nicht abgeschlossen ist. Dieser Bereich wird als *Zone thermischer Neutralität* oder *Indifferenzzone* bezeichnet und ist gekennzeichnet durch „die Abwesenheit irgendeiner Empfindung von Wärme oder Kälte“ (Graceley, Farrell & Grant, 2002, p.622). Die durchschnittliche Hauttemperatur des Menschen liegt innerhalb des Indifferenzbereiches von 30-35°C, schwankt jedoch in Abhängigkeit der adaptierten Fläche sowie der adaptierten Körperregion (vgl. Järvillehto & Hämäläinen, 1979; Kenshalo & Scott, 1966; Sherrick & Cholewiak, 1986; Kenshalo, 1976). Betrachtet man die Feuerungsraten der Thermorezeptoren, zeigt sich, dass beide Rezeptortypen feuern (z.B. Konietzny & Hensel, 1979; vgl. auch Abschnitt 2-1-1).

2-5-1-2 Dynamisches Temperaturempfinden

Die Wahrnehmung von Temperaturänderung wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Neben der Größe der Veränderung (Schrittgröße) zur Ausgangstemperatur der Haut tragen insbesondere zwei Faktoren zur dynamischen Temperaturwahrnehmung bei: *Größe* und *Intensität* der Temperaturänderung (s. Hardy & Oppel, 1937). Die Schrittgröße kennzeichnet dabei die Temperaturdifferenz, und die Intensität die Geschwindigkeit der Temperaturänderung, die sog. Veränderungsrate (z.B. Johnson, Darian-Smith, La Motte, Johnson & Oldfield, 1979).

Schrittgröße. Die Größe der Temperaturänderung ist besonders für thermale Schwellwerte im Übergangsbereich von Neutralität zu einer thermischen Empfindung relevant und hängt von der Hauttemperatur, der Änderungsrate der Stimuli sowie der Größe der stimulierten Fläche ab: Je kälter die Haut ist, desto größer muss die Temperaturzunahme sein, um eine Schwellenempfindung auszulösen; je langsamer die Änderungsrate und je kleiner die Fläche, desto größer die nötige Temperaturdifferenz.

Die Wahrnehmungsschwellen hängen von der Qualität der Temperaturreize ab: Die absoluten Schwellen für Kältereize sind durchweg geringer als die für Wärmereize, wenn die Haut-

temperatur an die Normaltemperatur adaptiert wurde (z.B. Stevens & Choo, 1998; Möltner, Hölz, Lautenbacher, Roscher & Strian, 1993; Claus, Hilz & Neundörfer, 1990; Jamal, Hansen, Weir & Ballantyne, 1985; Gray, Stevens & Marks, 1982). Die Kälteschwellen liegen bei ca. 0.14-0.71 K und die Wärmeschwellen bei ca. 0.13-1 K (z.B. Stevens & Choo, 1998; Jamal et al., 1985; Gray et al., 1982; vgl. Chen, Rainville & Bushnell, 1996; abweichend: vgl. Möltner et al., 1993; Claus, Hilz & Neundörfer, 1990). Schwellwerte für Wärmereize unter 31°C und für Kältereize über 36°C zeigen einen raschen Anstieg (z.B. Rózsa, Molinari, Greenspan & Kenshalo 1985; Kenshalo, 1970).

Die Temperatursensitivität ist abhängig von der Körperregion (z.B. Stevens & Choo, 1998) und zeigt eine Abnahme mit zunehmendem Alter (vgl. Stevens & Choo, 1998; Möltner et al., 1993; nicht: Gray et al., 1982).

Die Untersuchung der Diskriminierungsfähigkeit wurde bisher weitgehend vernachlässigt. Darian-Smith (1984b) berichtet Werte von 1-3% differenzierbarer Unterschiede zwischen thermalen Reizen bei Referenztemperaturen von 34°C (z.B. Johnson et al., 1979; Darian-Smith, Johnson, La Motte, Kenins, Shigenaga & Chee Ming, 1979; Darian-Smith & Johnson, 1977; Johnson et al., 1973; außerdem: Bertelsmann, Heimans, Weber, van der Veen & Shouten, 1985). Insgesamt zeigt sich der JND-% abhängig von der Schrittgröße, weniger von der Referenztemperatur (vgl. Johnson et al., 1979; Johnson et al., 1973): Die Diskriminierungsfähigkeit für Wärmeimpulse zeigt einen U-förmigen, die für Kälteimpulse einen linearen Zusammenhang mit zunehmender Schrittgröße.

Interessanterweise ist die Auflösungsfähigkeit des Menschen gegenüber Intensitätsunterschieden thermischer Reize deutlich höher als es die einzelne Wärmefasern vermitteln können (ca. 2.5-2.6 sec, z.B. Johnson et al., 1979; Darian-Smith & Johnson, 1977). Dies lässt sich nur durch räumliche Summation erklären (z.B. Johnson et al., 1979; Darian-Smith et al., 1979)

Veränderungsrate. Kenshalo, Holmes & Wood (1968) bestimmten die minimal nötige Temperaturänderung in Abhängigkeit der Veränderungsrate. Überschritt diese 0.1-2 K/sec (vgl. Kenshalo, 1976; Kenshalo, Holmes & Wood, 1968), blieben die Wahrnehmungsschwellen unbeeinflusst³. Bei schnelleren Veränderungsraten (< 0.1-0.5 K/sec) stieg die Absolutschwelle rasch an (z.B. Divert, 2002; Kenshalo, Holmes & Wood, 1968), wobei Abweichungen zwischen den in der Literatur berichteten Absolutschwellenwerten auf die Variation der Stimulusgröße zurückgeführt werden kann (vgl. Harding & Loescher, 2005; Divert, 2002; Hilz et al., 1999; Yarnitsky & Ochoa, 1991; Gray & Stevens, 1982).

Wie bereits oben berichtet, unterscheiden sich die Wahrnehmungsschwellen der Kälte- und Wärmereize nicht nur bezüglich der Größe der Temperaturänderung, sondern auch in Abhängigkeit der Veränderungsrate (vgl. Graceley, Farrell & Grant, 2002; Kenshalo, Holmes & Wood, 1968). Einige Forscher ermittelten eine Abhängigkeit der Schwellwerte für thermische Veränderung von der Qualität der Temperatur (vgl. Divert, 2002; Palmer, Martin, Steedman & Ravey, 2000).

2-5-1-3 Räumliche Faktoren – Stimulusgröße

Die berichteten Schwellwerte für die Größe der Temperaturänderung und deren Veränderungsrate werden von der Stimulusgröße beeinflusst (vgl. Hilz, Stemper, Axelrod, Kolodny & Neundörfer, 1999; Green & Zaharchuk, 2001; Hardy & Oppel, 1937): "if one touches just one fingertip to a warm object, it usually must be hot enough to burn before any sensation is aroused, whereas, one can readily detect small temperature increases when larger area of

³ Die ermittelte Kältschwelle liegt bei 0.2 K und die Wärmeschwelle bei 0.3 K.

skin, e.g., the palm of the hand, is exposed“ (Kenshalo, 1970, p. 38). Dies bedeutet, dass die thermische Information über die Kontaktfläche hinweg summiert wird. Besonders in Schwelennähe spielt die Größe der Berührungsfläche eine Rolle und resultiert in einer verbesserten Detektionsleistung (z.B. Marks, Stevens & Tepper, 1976; Kenshalo, Decker & Hamilton, 1967). Dies gilt für Kalt- und Warmreize in gleichem Maße (z.B. Graceley, Farrell & Grant, 2002; Greenspan & Kenshalo, 1985).

Greenspan & Kenshalo (1985) ermittelten empirisch einen funktionalen Zusammenhang F zwischen Größe der Stimulusfläche A (0.5-7.2 cm²) und der Summationsrate b

$$F = k \cdot A - b \quad (1),$$

wobei b für Wärmereize bei durchschnittlich 0.85 und für Kältereize bei durchschnittlich 0.63 liegt.

2-5-2 Temperaturempfinden bei Objektkontakt

Bei Objektkontakt nimmt der Mensch nicht nur Informationen über die thermische, sondern auch über die mechanische Beschaffenheit der Objektoberfläche resp. des Objekts auf (vgl. auch Abschnitt 2-1-1-3). Im Allgemeinen zeigt sich eine Erleichterung der Lokalisierung thermischer Reize, wenn sie von taktiler Stimulation begleitet ist: „This information received by the central nervous system about both the mechanical and thermal properties of the object touched is the basis for its identification“ (Darian-Smith, 1984b, p. 884). Eine Erhöhung der Genauigkeit thermischer Lokalisation trifft v.a. für warme Reize zu, die generell schwerer zu lokalisieren sind (z.B. Graceley et al., 2002; Craig & Rollman, 1999; Lee, McGillis & Greenspan, 1996; Stevens, 1989, 1982). Insgesamt trägt eine zusätzliche mechanische Stimulierung stärker positiv zur Temperaturempfindung von Wärmereize bei und spielt nur eine geringere Rolle für die Wahrnehmung von Kältereizen (z.B. Graceley et al., 2002); letztere werden ohnedies schneller und präziser erkannt werden (z.B. Fruhstorfer, 1976).

Während der Manipulation oder Exploration von Objekten werden Empfindungen lokaler Erwärmung oder Kühlung hervorgerufen, die auf die Temperaturdifferenz zwischen berührtem Objekt und kontaktierender Haut zurückzuführen sind. Es findet ein Temperatenausgleich zwischen Objekt und Haut statt. Mit Kontaktbeendigung normalisiert sich die Handtemperatur wieder, wenn auch langsamer und abhängig von den thermischen Eigenschaften von Hand und Objekt.

Bestimmende Faktoren für die Veränderung der Hauttemperatur sind die Größe der Kontaktfläche (z.B. Kenshalo, 1970), die Veränderungsrate und die Schrittgröße der die Temperaturänderung bestimmenden Eigenschaften des Objektes, d.h. seine Dicke, „the specific heat and the thermal conductivity of the surface material“ (Kenshalo, 1971, p. 141). Auch Eigenschaften der Hand, d.h. ihre momentane Temperatur (z.B. Molinari, Greenspan & Kenshalo, 1977), ihre Hautleitfähigkeit, sowie spezifische Eigenschaften der Thermorezeptoren und efferenten Fasern beeinflussen Schnelligkeit und Stärke der Temperaturänderung.

Wie in Abschnitt 2-1-1-2 bereits besprochen, werden Wärmereize langsamer (ca. 1-4 s) als Kältereize (ca. 1-2 s) übertragen (z.B. Darian-Smith et al., 1979; Fruhstorfer et al., 1974). Auch die Oberflächentemperatur des Fingers verändert sich in der ersten Sekunde am stärksten (z.B. Bergmann-Tiest, 2007; Ino et al., 1993;). Darüber hinaus ergaben Untersuchungen zur Reaktionszeit auf thermische Reize ähnliche Ergebnisse: Die mittlere Reaktionszeit auf Wärmereize liegt bei mindestens 1.5 s, bei Kältereize bei ca. 500 ms (vgl. Yarnitsky & Ochoa, 1991; Fruhstorfer, 1976; Fruhstorfer et al., 1974; Corson & Crannell, 1970; Vendrik, 1970). Die meisten Personen können auf Unterschiede zwischen Temperatu-

ren innerhalb von 1.5-2.5 s nach Onset des Stimulus reagieren (vgl. Johnson et al., 1979; Darian-Smith et al., 1979; Darian-Smith & Johnson, 1977; Johnson et al., 1973).

Zur Wahrnehmung und Identifikation thermischer Objekteigenschaften tragen, bei sonst konstant angenommenen Bedingungen, somit die thermische Leitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität des Objektes bei⁴. Demzufolge ist die Wahrnehmung thermischer Eigenschaften entweder durch die Größe des Temperaturwechsels oder seine Schnelligkeit bestimmt.

Erste Untersuchungen zur Identifikation und Diskriminierung thermischer Eigenschaften eines Objektes stellten eine geringe Sensitivität der Probanden fest (vgl. Kron, 2005; Jones & Berris, 2003, 2002; Ino et al., 1993). Dabei zeigt sich, dass besonders Objekte aus Holz (oder Nylon) von solchen aus Metall zu 90% korrekt unterschieden werden können, während die Wahrscheinlichkeit korrekter Zuordnung für andere verwendeten Materialien bei ca. 50% lag (z.B. Bergmann-Tiest, 2007; Jones & Berris, 2003; Kron & Schmidt, 2003; Ino et al., 1993). Dies ist nicht so verwunderlich, da sich die thermischen Eigenschaften dieser Objekte sehr stark voneinander unterscheiden.

Interessanterweise erleichterte die Stimulierung der thermischen Eigenschaften mittels einer jeweils festgelegten Veränderungsrate nur die Identifizierung von Aluminium, während Holz um den Faktor 0.7 schlechter zu identifizieren war (vgl. Ino et al., 1993). Caldwell, Wardle, Kocak & Goodwin (1996) stellten in ihrer Forschung fest, dass telepräsent dargebotener Objekte grundsätzlich abhängig von ihrer Temperatur besser oder schlechter identifiziert werden konnten: Waren die Temperaturdifferenzen größer als 3-4°C, wurden mehr als 85% korrekt differenziert. Wurde zusätzlich neben thermalen auch (pneumatisches) Kraftfeedback dargeboten, erhöhte sich die korrekte Identifizierung auf über 90%.

Jones & Berris (2003, 2002) nehmen darüber hinaus an, dass Menschen weniger nach Wärmeleitfähigkeit, sondern eher nach Wärmekapazität der Objekte diskriminieren.

In Anbetracht der Fähigkeit des Menschen sowohl Temperaturunterschiede als auch die Schnelligkeit der Temperaturänderung relativ genau wahrnehmen zu können (s. oben), ist allerdings anzunehmen, dass nicht eine thermische Eigenschaft allein zur Wahrnehmung beiträgt. Plaisier (2005) wies dementsprechend nach, dass Menschen nach beiden Faktoren diskriminieren können, sich aber in der Präferenz individuell unterscheiden (vgl. Plaisier, 2005).

2-6 Wahrnehmung von Bewegung, Position und aufgewendete Kraft

2-6-1 Wahrnehmung von Bewegung und Position

Informationen über Bewegung, statische Position sowie Muskelspannung (d.h. Kraft) der Gliedmaßen zueinander ohne Kontakt wird über das propriozeptive System vermittelt (für einen Überblick s. Johnson, 2002; Seow, 1988; Clark & Horch, 1986; Loomis & Lederman, 1986; Hall & McCloskey, 1983; McCloskey, 1978; Howard & Templeton, 1966). Innerhalb des propriozeptiven Systems wird demzufolge zwischen Bewegungs-, Stellungs- und Kraftsinn unterschieden. Bei der Propriozeption sind die in Abschnitt 2-1-2 dargestellten Rezeptoren beteiligt, außerdem konnten auch zusätzliche Einflüsse der Mechanorezeptoren (s. Ab-

⁴ Zur Vereinfachung wird angenommen, die Speicherkapazität der Hand sei unendlich groß, da über Stoffwechselprozesse der Körper bestrebt ist, eine konstante Körperkerntemperatur zu erhalten (s. Schmidt & Thews, 1983; Hensel, 1952, 1950) und die Hautleitfähigkeit kontrolliert.

schnitt 2-1-1) nachgewiesen werden. Darüber hinaus ist für eine Verarbeitung propriozeptiver Informationen eine Koordination u. a. mit dem motorischen System zur Einleitung, Planung und Durchführung von Bewegung nötig. Welchen genauen Anteil die einzelnen Signale an der Gesamtwahrnehmung haben, ist bisher jedoch nicht eindeutig geklärt.

Der Bewegungs- und der Stellungssinn können als voneinander unabhängig betrachtet werden. Zwischen beiden Sinnen zu trennen, ist im Alltag jedoch recht schwer.

Bei der Wahrnehmung von Bewegung kombiniert der Mensch Informationen aus der Geschwindigkeit sowie der Gelenkwinkelstellung während der Bewegung (z.B. Bevan, Cordo, Carlton & Carlton, 1994; Cordo, Carlton, Bevan, Carlton & Kerr, 1994). Bevor die Richtung der Bewegung wahrgenommen wird, kann Bewegung an sich detektiert werden (z.B. Laidlaw & Hamilton, 1934). Allgemein scheint das Einschätzen der Dauer respektive der Geschwindigkeit einer Bewegung einerseits weniger exakt zu sein als die zurückgelegte Distanz (z.B. Cordo et al., 1994; Hollingworth, 1909), andererseits wird das reale Ausmaß vollzogener Bewegung eher unterschätzt (z.B. Rymer & D'Almeida, 1980; Howard & Anstis, 1974), auch wenn die Genauigkeit von Distanzeinschätzungen der Winkeleinschätzung überlegen ist (Bevan et al., 1994).

Die Wahrnehmung von Veränderungen im Gelenkwinkel scheint weniger von seiner Endposition abhängig zu sein als von minimaler Bewegung (z.B. Djupsjöbacka & Domkin, 2005; Clark, Burgess, Chapin & Lipscomb, 1985). Wird z.B. der Arm passiv (durch eine Apparatur verursacht) bewegt, können Abweichungen von ca. 0.5° detektiert werden (z.B. Jones, Hunter & Irwin, 1992).

Bei der Untersuchung des Stellungssinns kann auf Bewegung nicht vollständig verzichtet werden; sie wird aber lediglich passiv (durch eine Apparatur) und so langsam ausgeführt, dass die Bewegung grundsätzlich unterhalb der Detektionsschwelle für Bewegung liegt, also vom Probanden nicht wahrgenommen werden kann (z.B. Clark, Burgess & Chapin, 1986; Clark et al., 1985). Eine getrennte Wahrnehmung des Stellungs- und Bewegungssinns kann nur in diesem Fall als gegeben angenommen werden.

Inwieweit und ob der Proband die Stellung seiner Gliedmaßen erkennen kann – so zeigten entsprechende Forschungen – ist dabei abhängig von den Gliedmaßen selbst. So konnte das Auflösungsvermögen des Stellungssinns mit höherer Genauigkeit in den proximalen Gelenken nachgewiesen werden (z.B. Van Beers, Sittig & Denier van der Gon, 1998; Clark, 1992; De Domenica & McCloskey, 1987). Über das Schultergelenk kann beispielsweise die Stellung des Arms genauer abgerufen werden als über die Faust und das dritte (das sog. Metacarpophalangeal- bzw. MCP-) Fingerglied (z.B. Van Beers et al., 1998; Clark, 1992).

Grundsätzlich sind Menschen in der Lage, die ursprüngliche Stellung ihrer Gliedmaßen nach kurzer Pause relativ exakt wieder einzunehmen, selbst wenn zwischen Darbietung (also dem erstmaligen Einnehmen der Stellung) und Abruf (dem erneuten Einnehmen der ursprünglichen Stellung) eine kurze Zeitverzögerung besteht (z.B. Gentaz & Hatwell, 1999). Die Dauer der Verzögerung zwischen Darbietung und Abruf beeinflusst dabei die einzuschätzende Distanz (Ausmaß der zurückgelegten Bewegung) stärker als eine Variation der Bewegungsrichtung oder der Startposition der Bewegung (z.B. Ashby, Shea & Howard, 1980). Eine Verzögerung kann einen *Shift* bezüglich des Referenzrahmens von egozentrisch auf allozentrisch bewirken (z.B. Zuidhoek, Kappers, van der Lubbe & Postma, 2003). Bei der Betrachtung aus *egozentrischer* Sicht wird der umgebende Raum und der eigene Körper aus der Sicht des Beobachters am aktuellen Ausgangspunkt beurteilt, bei der *allozentrischen* Betrachtung wird, bezogen auf den aktuellen Ausgangspunkt, ein globaler Sichtwinkel eingenommen.

Im Allgemeinen werden kurze zurückgelegte Bewegungen (Distanzen) von einer festen Startposition aus häufig überschätzt, lange Distanzen dagegen unterschätzt, wobei die allgemeine Genauigkeit bei der Einschätzung langer Distanzen überwiegt (z.B. Brown, Knauff & Rosenbaum, 1948). Wird ein Verbleiben an der einzunehmenden Position über einen langen Zeitraum verlangt, verändert sich mit zunehmender Zeit die Wahrnehmung der Armposition, da die lange einzuhaltende Stellung intern als Standardposition kalibriert wird (z.B.

Cratty & Duffy, 1969; Cameron & Wertheimer, 1965; Day & Singer, 1964; Gibson, 1933). Daneben zeigt sich, dass eine Interaktion des Stellungs- und Bewegungssinns zu einer Reduzierung des Fehlers beim Wiedereinnehmen der Ursprungsposition führt (z.B. Djupsjöbacka & Domkin, 2005; Gandevia & McCloskey, 1976).

Auch die Hautrezeptoren, z.B. die Ruffini Körperchen, tragen mit ihren Informationen über die Hautdehnung zur Gesamtwahrnehmung der Körperstellung bei (z.B. Jones et al., 1992; Clark et al., 1986; Gandevia, McCloskey & Potter, 1983). So führt beispielsweise eine Stimulation des Arms durch Vibrationen zu einer veränderten Wahrnehmung der Armstellung.

Der Stellungssinn erlaubt, dass eine interne Repräsentation der einzelnen Gliedmaßen zueinander sowie des haptisch erreichbaren Raums gebildet werden. Es konnte gezeigt werden, dass dieses interne Modell Verzerrungen in der Wahrnehmung unterliegt (z.B. Kappers, 2002, 1999), wobei die Abweichungen von der wahrgenommen zur tatsächlichen Realität auf horizontaler Ebene immer dann größer sind, wenn die Reize auf horizontaler Ebene dargeboten werden, oder auf vertikaler Ebene stärker sind, wenn die Reize in der midsagittalen⁵ Ebene geboten wurden. Die aus dem visuellen System bekannte *Vertikal-Horizontal-Illusion* lässt sich auch bei der haptischen Exploration vertikal-horizontaler Linien nachweisen (z.B. Gentaz & Hatwell, 2004; Heller, Calcaterra, Burson & Green, 1997; Heller & Joyner, 1993; Cheng, 1968; Hatwell, 1960). In der horizontalen Ebene zum Körper werden vertikale Linien im Vergleich zu horizontalen Linien in ihrer Höhe überschätzt. Diese Illusion ist nicht durch die Sicht mediiert (z.B. Heller & Joyner, 1993), sondern entsteht durch das Muster der Armbewegung (z.B. Heller et al., 1997), also die Explorationsbewegung. Ähnlich werden auch radiale Bewegungen (vom Körper weg und zu ihm hin) in ihrer Ausdehnung überschätzt, während tangentielle Bewegungen (von einer zur anderen Körperseite) eher unterschätzt werden. Die Sensitivität bei radialen Bewegungen ist höher als bei tangentialen Bewegungen (vgl. Essock, Krebs & Prather, 1997), dennoch wird auch hier die wahre Größe immer dann unterschätzt, wenn das Objekt weiter vom Probanden entfernt ist (vgl. Bartley, 1953). Diese Richtungsabhängigkeit der haptischen Raumwahrnehmung ist von der Armbewegung an sich sowie seiner Bewegungs-Schnelligkeit abhängig. Wenn die Bewegungsdauer konstant gehalten wurde, konnte die Forschung von Armstrong & Marks (1999) jedoch keinen Unterschied zwischen tangentialen und vertikalen Bewegungen mehr festmachen.

Ein weiterer Effekt der Richtungsabhängigkeit haptischer Raumwahrnehmung ist der aus dem Sehen bekannte *Oblique-Effekt* (z.B. Appelle, 1972): Die Einschätzung der Orientierung ist am genauesten für horizontale und vertikale Linien (resp. 0° und 90° Winkel) und am ungenauesten für oblique (d.h. um 45° oder 135°) geneigte Linien oder Winkel (z.B. Kappers, 2003, 2002, 1999). Auch bei dieser Illusion spielt die Art der Exploration eine Rolle: Gentaz & Hatwell (1998, 1996) fanden so heraus, dass Schulter-Handbewegungen zur Aufrechterhaltung der Illusion beitragen. Auf der anderen Seite ließen sich immer wieder interindividuelle Unterschiede feststellen (z.B. Kappers, 2004, 2003), genauso wie sich der Oblique-Effekt auch an unterschiedlichen Positionen im haptischen Raum replizieren ließ (z.B. Kappers, 2003, 2002, 1999) und möglicherweise visuell mediiert ist (z.B. Appelle & Gravetter, 1985).

Die Abhängigkeit der haptischen Raumwahrnehmung von der Art ihrer Exploration, legt die Annahme nahe, dass abhängig von der Explorationsbewegung höhere Verarbeitungsprozesse beteiligt sind, um aus den Signalen der Propriozeptoren, Mechanorezeptoren und motorischen Bewegungen eine interne Repräsentation des Objekts bilden zu können (z.B. Lakatos & Marks, 1998). Klatzky & Lederman (2003b) untersuchten den Referenzrahmen, der dem manipulatorischen Raum zugrunde liegt, und fanden heraus, dass er abhängig von der gestellten Aufgabe ist: Die reine Wiederholung der zuvor dargebotenen Stellung verlangt

⁵ Die midsagittale Ebene ist die Ebene, die senkrecht auf der horizontalen steht und desgleichen senkrecht zum Körper des Untersuchers dargeboten wird.

lediglich eine propriozeptive Repräsentation. Um jedoch Winkel oder Abstände einschätzen zu können, ist eine konfigurale Repräsentation erforderlich, die zu einer erhöhten Verzerrung führt, weil die wahrgenommenen Parameter immer abstrakter werden (vgl. Klatzky & Lederman, 2003b). Der haptische Referenzrahmen scheint dabei an sich weniger egozentrisch oder allozentrisch zu sein, sondern vielmehr eine Kombination von beidem (z.B. Kappers, 2003, 2004; Zuidhoek et al., 2003; Luyat, Gentaz, Corte & Guerraz, 2001). Dabei wirkt v.a. der egozentrische Referenzrahmen verzerrend (z.B. Volčič, Kappers & Koenderink, in press; Zuidhoek et al., 2003).

Nicht nur Distanzen, Winkel oder Bewegungen können wahrgenommen und in einem internen Modell repräsentiert werden: Auch die Stellung der Finger zueinander erlaubt die Wahrnehmung von Form oder Kurven, was wiederum eine Integration der Informationen über mehrere Finger erforderlich macht. Die Genauigkeit der Wahrnehmung hängt jedoch von der Variabilität des Interfingerabstands (also des Abstands der Finger zueinander) ab (z.B. Hollins, 2002; Pont, Kappers & Koenderink, 1999; Craig & Quian, 1997).

2-6-2 Wahrnehmung von Kraft

Der Kraftsinn kann untergliedert werden in den Sinn für Kraftaufwand und den Sinn für Muskelanspannung (für einen Überblick s. Klatzky & Lederman, 2003a; Clark & Horch, 1986; McCloskey, 1980). Während ersterer v.a. die aus dem ZNS kommenden Signale zur Steuerung der Muskelbewegungen etc. verarbeitet, nimmt der zweite v.a. Informationen aus den Golgi-Sehnenorganen auf (vgl. Abschnitt 2-1-2). Beide Sinne können unabhängig voneinander untersucht werden.

Neben der Wahrnehmung des Kraftaufwandes ist der Mensch auch in der Lage, die Anspannung der Muskeln zu beurteilen. Selbst wenn die Muskeln anästhesiert sind, kann er Kraft aufbringen, nicht aber den Kraftaufwand konstant halten.

Die Wahrnehmung des Kraftaufwands wird in der Forschung v.a. über die Einschätzung des Gewichts von Objekten erhoben. Informationen aus unterschiedlichen Bereichen sollen zur Gesamtwahrnehmung beizutragen: Dazu zählen Informationen, die von den Propriozeptoren oder bei Objektkontakt von den Mechanorezeptoren weitergeleitet werden oder die vom ZNS an den Muskel gesendet werden.

Es ließ sich durch Forschungen zeigen, dass eine Schwächung der Muskeln (z.B. durch Gabe von Drogen oder durch Verletzung oder Krankheit), die wiederum eine Reduktion der aufbringbaren Kraft bewirkt, dazu führt, dass die Objekte zunehmend als schwerer wahrgenommen werden (z.B. Gandevia & McCloskey, 1977a, b). Wird der Muskel dagegen elektrisch stimuliert, wird das Objekt als leichter eingeschätzt (z.B. McCloskey, 1978; Gandevia & McCloskey, 1977a). Werden leichte Objekte nacheinander angehoben und soll im Anschluss daran die tatsächliche Schwere eines Objektes eingeschätzt werden, so wird diese bei einem leichten Objekt unter-, bei einem schweren Objekt überschätzt. Eine weitere Gewicht-Erwartungs-Illusion beschrieben beispielsweise Clark & Horch (1986), die feststellen konnten, dass wenn die Muskeln vor dem Heben eines Objektes angespannt wurden, sich der Eindruck erhöhte, das Objekt wäre schwerer als es eigentlich ist.

Andere bekannte, nicht rein haptische Illusionen, bei deren Entstehung im Besonderen auch die visuelle Modalität beiträgt (vgl. Abschnitt 6-1), sind die sog. Größe-Gewichts-Illusion⁶ (z.B. Murray, Ellis, Bandomir & Ross, 1999; Ellis & Lederman, 1999, 1993), die Material-

⁶ Größe-Gewichts-Illusion: Die Größe eines Objektes beeinflusst die Wahrnehmung seines Gewichtes. Große Objekte werden als vergleichsweise schwerer empfunden.

Gewichts-Illusion⁷ (z.B. Rinkeauer, Mattes & Ulrich, 1999; Flanagan & Wing, 1997; Flanagan, Wing, Allison & Spenceley, 1995) und die Golfball-Illusion⁸ (s. Ellis & Lederman, 1998). Auch beim Entstehen dieser Illusionen zeigt sich eine Beteiligung zentralnervöser Verarbeitung (vgl. z.B. Kawai, 2003a, b), wobei hier v.a. die beim Heben eines Objektes um die primäre (meist vertikale) Achse entstehenden rotationalen Kräfte beteiligt sind (vgl. Amazeen & Jarrett, 2003; Amazeen & Turvey, 1996). Daneben spielen auch andere Effekte, wie Greifkraft, Art des Greifens (z.B. Flanagan & Bandomir, 2000), Oberflächenmaterial sowie individuelle Erwartungen über die Schwere des Objekts (v.a. im Bereich mittleren Gewichts, s. Ellis & Lederman, 1998) eine Rolle (vgl. bes. Flanagan & Bandomir, 2000). All dies legt nahe, dass hauptsächlich zentrale Steuersignale zur Wahrnehmung mechanischer Objekteigenschaften wie Schwere beitragen, weniger die von den beteiligten Muskeln durch Propriozeptoren aufgenommenen Informationen (z.B. McCloskey, 1980, 1978; Gandevia & McCloskey, 1977a, b). Menschen sind zwar in der Lage, Muskelspannungen wahrzunehmen (s. oben), verlassen sich bei der Beurteilung des Objekts jedoch eher auf ihren Kraftsinn.

Bei der Wahrnehmung der meisten mechanischen Objekteigenschaften, wie beispielsweise Nachgiebigkeit oder Gewicht, spielen nachweislich auch taktile Reize eine Rolle. Srinivasan & La Motte (1995) ließen ihre Probanden Objekte mit einem Finger explorieren und zeigten, dass sich die Unterscheidungsfähigkeit nachgiebiger und deformierbarer Objekte (Silikonwürfel) deutlich verschlechterte, wenn taktile Informationen über die Deformierung des Objekts an den Fingern fehlten. Dieser Effekt erwies sich als unabhängig davon, ob aktiv oder passiv exploriert wurde, d.h. der Proband selbst aktiv explorieren durfte, oder beim Explorieren geführt wurde. Auch bei der Wahrnehmung von Kraft sind zusätzliche taktile Informationen für die Unterscheidung von Kräften kleiner als 1 N notwendig (z.B. Raj, Ingty & Devanandan, 1985). Die Adaptation der Hand an eine aufgebrachte Kraft (z.B. Holway, Golding & Zigler, 1938) oder ein passives Explorieren (z.B. Brodie & Ross, 1984; Holway & Hurvich, 1937) beeinträchtigt die Sensitivität für Kraftdiskriminierung um das ca. 1.6 fache. Andere Studien zeigten, dass, wenn Federn zwischen Daumen und Zeigefinger gedrückt werden, selbst das Anästhesieren von Muskelendplatten, Haut- und Gelenkrezeptoren zu keiner Verschlechterung der Diskriminierungsleistung führt. Für die Wahrnehmung von Kraft beim Greifen von Federn sind folglich allein propriozeptive Informationen aus den Muskeln und Spannungsrezeptoren ausreichend, während für die Wahrnehmung von Nachgiebigkeit die Abwesenheit taktiler oder neben dem Fehlen taktiler Informationen auch das Fehlen von Gelenkinformationen zu einer Verschlechterung der Objekteinschätzung führt (s. Srinivasan & La Motte, 1995; Roland & Ladegaard-Pedersen, 1977).

⁷ Material-Gewichts-Illusion: Das Oberflächenmaterial eines Objektes beeinflusst die Wahrnehmung seines Gewichtes. Objekte mit dichterem Oberflächenstruktur werden als schwerer empfunden (z.B. Metall vs. Holz).

⁸ Golfball-Illusion: Die Erwartung beeinflusst die Gewichtswahrnehmung. Golfer beurteilen die Schwere der Golfbälle in Abhängigkeit ihrer Erwartung; dieser Unterschied zeigt sich nicht bei Nicht-Golfern.

3 METHODEN ZUR ERFASSUNG MENSCHLICHER WAHRNEHMUNG – PSYCHOPHYSIK

„Die Empfindungen, die uns die Sinnesorgane verschaffen, zeichnen sich ferner dadurch sehr aus, daß sehr schwache Einwirkungen auf dieselben, die nicht im mindesten verletzend sind, doch sehr deutlich empfunden werden, so daß wir viele Grade der Empfindungen ganz bestimmt unterscheiden und sogar abmessen, und unzählige qualitative Verschiedenheiten wahrnehmen können.“

(Weber, 1846, S. 494)

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Grundlagen menschlicher haptischer Informationsverarbeitung zusammengefasst. Um jedoch diese Informationen für die Gestaltung eines TPTA-Systems nutzen zu können, muss Wahrnehmung quantifiziert werden. Dazu bietet die Psychophysik eine Anzahl von Methoden, die für die Arbeit von Bedeutung sind und im Folgenden näher erläutert werden sollen.

Wahrnehmung ist ein Prozess der Reizaufnahme, Weiterleitung und Verarbeitung von physikalischen Informationen aus der Umwelt oder von internen sensorischen Informationen (wie z.B. über Positionierung der Gliedmaßen). Haptisches Wahrnehmen verlangt darüber hinaus eine Interaktion mit der Umwelt, insbesondere mit darin befindlichen Gegenständen oder Objekten. Durch Manipulation und Exploration der Objekte werden Informationen über die Rezeptoren aus Haut, Gelenken und Muskeln aufgenommen und zur Verarbeitung an den Kortex weitergeleitet und über Verschaltung mit motorischen Bahnen Bewegungen kontrolliert, koordiniert und gesteuert.

Die zu verarbeitende Informationsmenge ist dabei sehr hoch, so dass die aufzunehmende Reizmenge auf unterschiedlichen Stufen der Verarbeitung und durch unterschiedliche Mechanismen grundsätzlich reduziert wird. Wie bereits in Kapitel 1 angedeutet, ist das Auflösungsvermögen der Sinne beschränkt: Inadäquate physikalische Reize und adäquate Stimuli, deren Intensität die Detektionsschwelle (auch Absolutschwelle genannt) unterschreitet, können nicht wahrgenommen werden. Das sensorische System ist somit selektiv. Die Bandbreite wahrnehmbarer visueller Reize liegt beispielsweise zwischen Wellenlängen von 400 und 700 nm mit einem Peak bei 560 nm (bei Helladaptation), die Bandbreite wahrnehmbarer auditiver Reize zwischen Frequenzen von 20 und 20.000 Hz mit einem Peak bei 3.000 Hz und die vibrotaktile Reize bei Frequenzen von ca. 10 bis 1.000 Hz mit einer optimalen Frequenz von 250 Hz (vgl. Marks, 1978). Daneben werden physikalische Reize aber auch dann nicht wahrgenommen, wenn ihre Variabilität zu gering ist (und sie somit unterhalb der Unterschiedsschwelle liegen).

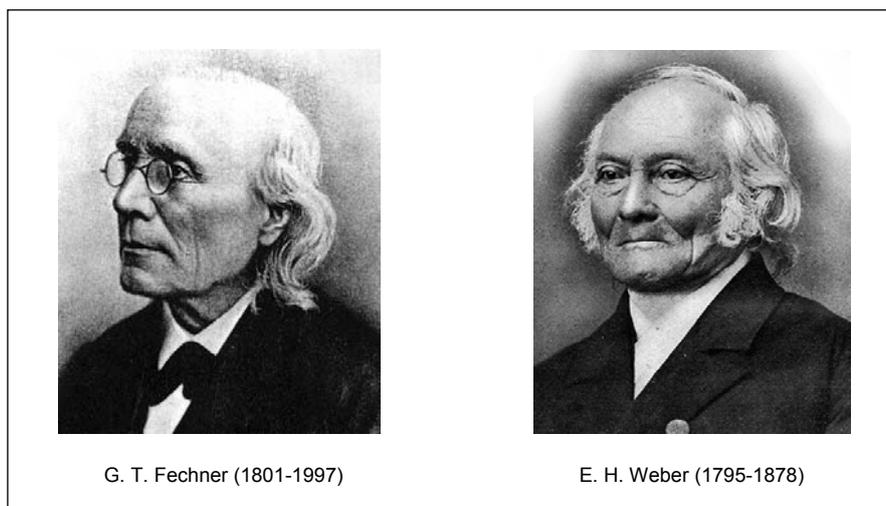
Einen Ansatz, mit dem Wahrnehmung messbar gemacht werden kann und somit Aussagen über die Beziehung zwischen physikalischem Reizparameter (z.B. Intensität) und der Sensitivität bzw. Diskriminierbarkeit getroffen werden können (s. Abschnitt 3-1), bietet die Psychophysik. Allerdings berücksichtigt die von der klassischen Psychophysik postulierte Annahme, ein physikalischer Reiz führe ceteris paribus zu einer separierbaren Wahrnehmung, nicht die Variabilität der Rezeptoren. Denn eine Reizpräsentation kann in diesem Verfahren auch mit der von einem Reiz unabhängigen Spontanaktivität der Rezeptoren verwechselt werden. Ein Reiz führt nämlich nicht immer zu einer Wahrnehmung.

Um direkt die Beziehung zwischen physikalischem Reiz und Empfindung zu quantifizieren, entwickelte Stevens (1960) diverse Methoden, um die Empfindungsstärke z.B. unterschiedlicher Reizintensitäten zu erheben (s. Abschnitt 3-3). Auf diese Forschungsergebnisse wird im Folgenden zurückgegriffen.

3-1 Die „klassische“ Psychophysik

Im 18. und 19. Jahrhundert vertraten viele Gelehrte die Ansicht, dass Wahrnehmung nicht objektiv messbar sei. Einzig der Physiker und Physiologe Gustav Theodor Fechner (s. Abbildung 3-1) setzte sich in seinem Werk »Elemente der Psychophysik« mit der Beziehung zwischen physikalischen Reizen und der resultierenden bewussten Empfindung wissenschaftlich auseinander und entwickelte Methoden zum Messbarmachen mentaler Ereignisse. Aus physikalischen Reizen resultierende Empfindungen mithilfe von Fechner's Methoden zu untersuchen, wurde in der Folgezeit zu einem Hauptbereich der experimentellen Psychologie.

Das Grundkonzept der Psychophysik wird in Abschnitt 3-1-1 erläutert, die von Fechner entwickelten sog. „klassischen“ Methoden sowie die sich daraus weiterentwickelten Verfahren zur Schwellenerhebung und ihre Bedeutung für die Forschung werden in Abschnitt 3-1-2 vorgestellt.



G. T. Fechner (1801-1897)

E. H. Weber (1795-1878)

Abb. 3-1 Die Begründer der Psychophysik

3-1-1 Absolut- und Unterschiedsschwelle

Zentrales Konzept der Psychophysik ist die sensorische Schwelle (*lat.* limen): „Den Punkt, wo die Merklichkeit eines Reizes oder eines Reizunterschiedes beginnt und schwindet, wollen wir kurz die Schwelle nennen“ (Fechner, 1860, S. 238). Die Schwelle beschreibt somit den Grenzwert auf einem Reizkontinuum, ab dem ein Reiz gerade eine Reaktion bzw. gerade keine Reaktion mehr hervorrufen kann (für einen Überblick s. Gescheider, 1985; Engen,

1971). Zwei Schwellenarten können voneinander unterschieden werden: Die *Unterschiedsschwelle*, welche zuerst von Weber (1846) untersucht wurde, sowie die *Absolutschwelle*, mit der sich Fechner (1860) beschäftigte.

Die Unterschiedsschwelle. In seinem Buch »Elemente der Psychophysik« setzte sich Fechner mit dem Werk des Physiologen Ernst Heinrich Weber (s. Abbildung 3-1) auseinander, der intensive Forschungen zur Diskriminierung von Gewichten unternommen hatte. Unter der von ihm gemessenen Unterschiedsschwelle (oder: Differenz Limen, kurz: DL) wird „die Größe des Unterschieds zweier Reize [verstanden], welche erforderlich ist, dass der Unterschied als vorhanden erkannt“ (Fechner, 1882, S. 177) wird. Die Unterschiedsschwelle wird auch als eben merklicher Reizunterschied (*engl.* just noticeable difference, kurz: JND) bezeichnet.

Weber entdeckte, dass mit zunehmendem Standardgewicht S_{st} die Unterschiedsschwelle DL linear zunimmt. Fechner bezeichnete diesen Zusammenhang als *Weber's Gesetz* (Fechner, 1860):

$$\frac{DL}{S_{st}} = k \quad (2).$$

Das Weber'sche Gesetz wurde in der Forschung vielfach belegt und zeigt eine breite Gültigkeit. Nur mit zunehmender Nähe zur Absolutschwelle, steigen die sog. *Weber-Brüche* (k bzw. bei auch in Prozent angegeben als JND-%), rasch an (z.B. Fechner, 1882). Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wurde Weber's Gesetz wie folgt modifiziert:

$$\frac{DL}{S_{st} + a} = k \quad (3).$$

Dabei ist a eine Konstante mit meist sehr geringem Wert, die mit zunehmender Nähe zur Absolutschwelle den Weber-Bruch stärker beeinflusst als mit zunehmender Größe des Standardreizes S_{st} . Die Konstante a wird entweder interpretiert als Absolutschwellwert oder als sensorisches Rauschen, im Sinne der Spontanaktivität der Neurone.

Als **Absolutschwelle** (oder: Reiz Limen, kurz: RL) wird die kleinste Menge an Reizintensität bezeichnet, die nötig ist, um eine Empfindung hervorzurufen. Anders ausgedrückt, „die Größe des Reizes, welcher erst überschritten sein muss, damit das Dasein des Reizes durch eine merkbare Empfindung erkannt werde“ (Fechner, 1882, S. 177). Da der Übergang von Nichtempfinden zu Empfinden nicht absolut ist – die menschliche Sensitivität ist gewissen Schwankungen unterlegen – wird als Absolutschwelle meist der Wert bezeichnet, bei dem in 50% der Fälle eine Empfindung hervorgerufen wird.

3-1-2 Methoden zur Schwellenbestimmung

3-1-2-1 Klassische Methoden nach Fechner

Fechner entwickelte drei Methoden zum Messbarmachen der Wahrnehmung, die heute als „klassische“ Methoden bezeichnet werden (nach Goldstein, 2002): Die *Konstanz-*, die *Grenz-* und die *Herstellungsmethode*. „Diese drei Methoden führen auf verschiedenen sich ergänzenden Wegen zu demselben Ziel: Bei der ersten wird die Grenze zwischen übermerklichen und untermerklichen Unterschieden als eben merklicher Unterschied betrachtet [Grenzme-

thode], bei der zweiten werden übermerkliche Unterschiede gezählt (die nach Zufälligkeit bald in richtigem, bald falschem Sinne ausfallen) [*Anm. des Autors: Konstanzmethode*], bei der dritten werden unmerkliche Unterschiede gemessen [*Anm. d. A.: Herstellungsmethode*]“ (Fechner, 1860, S. 73).

Konstanzmethode. Bei der Konstanzmethode – von Fechner (1860) als *Methode der richtigen und falschen Fälle* bezeichnet – werden eine Reihe zuvor ausgewählter, diskreter Stimuli, bzw. diskrete Werte einer Stimulusdimension, wiederholt dargeboten.

Im Falle der Absolutschwellermittlung (RL) werden einzelne Werte, bei der Unterschiedsschwellerhebung (DL) einzelne Reizpaare dargeboten. Die Wahrscheinlichkeit, den Reiz zu spüren (RL) bzw. einen der beiden Reize als unterschiedlich wahrzunehmen (DL), wird gegen die Reizgröße abgetragen. Dieser funktionelle Zusammenhang wird als psychometrische Funktion bezeichnet (s. Abbildung 3-2). An den erhaltenen Wertezusammenhang wird eine mathematische Funktion (in der Regel eine Sigmoidfunktion) angepasst. Bei Erhebung der Absolutschwelle wird der Wert, der in 50% der Fälle detektiert wird, als RL festgesetzt. Im Falle der Unterschiedsschwellenbestimmung werden zwei relevante Parameter aus der angepassten Funktion bestimmt:

- der PSE (*engl. Point of Subjective Equality*), der den 50%-Punkt der Kurve bezeichnet,
- die Steigung der psychometrischen Funktion im PSE.

Letztere bestimmt die Standardabweichung, mit der die individuellen Urteile des Probanden in den Paarvergleichen um den Mittelwert (PSE) streuen. Sie ist damit ein Maß für die Diskriminierungsleistung und kennzeichnet die Unterschiedsschwelle DL (vgl. Helbig & Ernst, 2007).

Die Konstanzmethode ist die genaueste der Fechner-Methoden; sie vermeidet Habituationseffekte und Perseverationstendenzen des Probanden (s. Glossar). Allerdings muss über Vortests ermittelt werden, wo sich die Schwelle (in diesem Fall v.a. der RL) ungefähr befindet. Darüber hinaus wird, um eine Kurvenanpassung möglich werden zu lassen, eine häufige Reizdarbietung nötig, was eine lange Testung erforderlich macht.

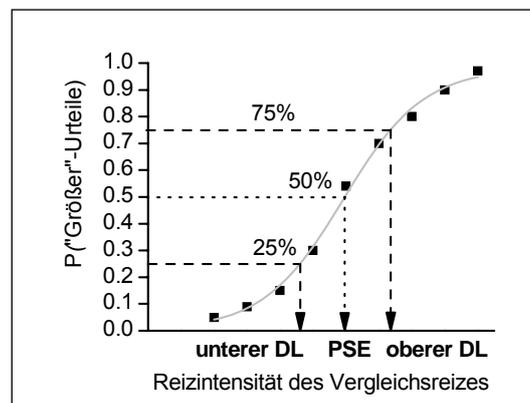


Abb. 3-2 Typische psychometrische Funktion für die Unterschiedsschwelle erhoben über die Konstanzmethode: An der Stelle, bei der in 50% der Fälle mit „größer“ geantwortet wird, liegt der PSE. Der obere bzw. untere DL wird meist als der Punkt, bei dem die Reizintensität des Vergleichsreizes in 75 bzw. 25% der Fälle entdeckt wird.

Grenzmethode. Bei der Grenzmethode – nach Fechner (1860) die *Methode der eben merklichen Unterschiede* – werden Reize in auf- und absteigender Reihenfolge dem Probanden präsentiert, die oberhalb bzw. unterhalb der Schwelle liegen. Meist bildet der Umkehrpunkt, d.h. der erste Punkt, an dem das Antwortverhalten geändert wird, den Abschluss einer auf- bzw. absteigenden Sequenz.

Die Grenzmethod ist zwar weniger genau als die Konstanzmethode, kann aber befriedigende Ergebnisse liefern, wenn den bekannten Problemen dieser Methode adäquat begegnet wird. Beispielsweise können Perseverationstendenzen durch mehrmaliges Darbieten sowohl auf- als auch absteigender Sequenzen und Erwartungseffekten durch eine Variation des Startpunktes der Sequenzen begegnet werden.

Die Absolutschwelle RL ist hier als der Mittelwert der Übergangspunkte definiert, d.h. als der Punkt einer ab- oder aufsteigenden Reihe, an dem das Antwortverhalten wechselt. Dasselbe gilt für die Unterschiedsschwelle DL. Hat der Proband statt Verschieden-Gleich-Urteilen die Richtung des Unterschieds zu beurteilen, d.h. ob die zweite Reizdarbietung einen größeren oder kleineren Reiz enthält, wird die Unterschiedsschwelle als der Punkt definiert, an dem das Antwortverhalten von größer zu kleiner wechselt. Es werden demzufolge zwei Übergangspunkte erhoben, die sich daraus ergeben, dass der Proband zwischen zwei dargebotenen Reizen keinen Unterschied wahrnehmen kann. Dies bedeutet freilich, dass neben Größer-kleiner-Urteilen noch eine weitere Antwort zugelassen wird, nämlich „kein Unterschied wahrgenommen“. Somit entsteht zwischen den beiden Unterschiedsschwellen ein Unsicherheitsintervall. Als DL gilt dann das halbe Unsicherheitsintervall, das wiederum begrenzt wird von den Übergangspunkten (größer-gleich, gleich-kleiner).

Herstellungsmethode. Im Gegensatz zur Grenzmethod kann bei der Herstellungsmethode, nach Fechner (1860) die *Methode der mittleren Fehler*, der Proband den Reizwert, bei dem er gerade eben nichts mehr wahrnehmen kann (RL) selbst einstellen. In der Regel ist der Reizwert kontinuierlich veränderbar. Wie bei der Grenzmethod werden mehrere Sequenzen durchgeführt, bei denen der erste Reiz bzw. der Testbeginn bei einem Reiz über oder unter der Schwelle liegt. Als Schwellwert gilt auch hier der Mittelwert der eingestellten Werte.

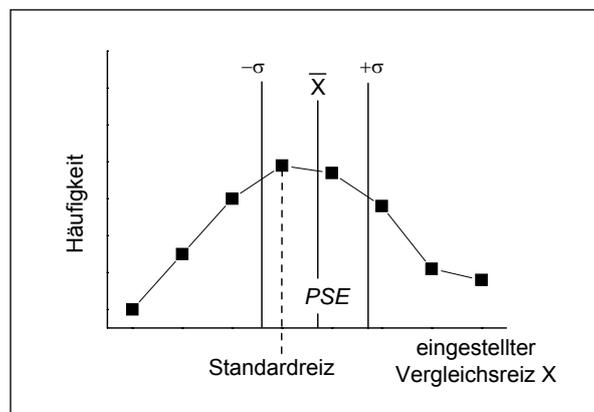


Abb. 3-3 Häufigkeitsverteilung der eingestellten Vergleichsreize bei der Erhebung der Unterschiedsschwelle über die Herstellungsmethode. Der Mittelwert der Verteilung entspricht dem PSE, die Standardabweichung σ dem DL.

Auch die Unterschiedsschwelle (DL) kann über die Herstellungsmethode erfasst werden. Dabei wird der Proband aufgefordert eine Reizintensität so einzustellen, dass sie mit dem Standardreiz übereinstimmt. Bei häufigem Matching des Vergleichsreizes an die wahrgenommene Intensität des Standardreizes kommt es in einigen Fällen zur Über- und in anderen zur Unterschätzung der tatsächlichen Intensität (s. Abbildung 3-3).

Der Mittelwert dieser Häufigkeitsverteilung der einzelnen Settings des Vergleichsreizes entspricht dem PSE. Wenn keinerlei Verzerrung (d.h. konstanter Fehler, engl. constant errors CE) vorliegt, müsste der PSE dem Standardreiz entsprechen. Darüber hinaus ist die Diskriminierungsleistung über die Standardabweichung messbar: Wenn die eingestellten Vergleichsreize breit um den Standardreiz gestreut sind, ist die Leistung gering. Als Maß für die

Streuung und somit für den DL wird die Standardabweichung (σ) herangezogen und über folgender Formel berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum X^2 - (\sum X)^2}{n^2}} \quad (4).$$

Dabei bezeichnet n die Anzahl der Wiederholungen und X den aktuell eingestellten Vergleichswert durch den Probanden.

Probleme der klassischen Schwellenerhebungsmethoden. Fechner (1860) schrieb schon in seinem Buch »Elemente der Psychophysik«, dass die Grenzmethod „die einfachste, directeste (ist und) [...] verhältnismässig am schellsten zum Ziele [führt, dadurch allerdings zu] keiner so grossen definitiven Präcision fähig“ (Fechner, 1860, S. 74) ist. Die Konstanzmethode bietet nach Fechner (1860) den deutlichen Vorteil, dass sie neben der Bestimmung der Unterschiedsschwelle auch „etwas grössere und kleinere Unterschiede nach Belieben“ (S. 74) mit untersuchen kann; sie ist die genaueste, jedoch auch die aufwendigste. Bei der Herstellungsmethode kann es zu einer Unterschätzung des wahren Schwellwerts führen.

Als deutliche Nachteile der klassischen Methoden sieht die heutige Forschung, so z.B. Treutwein (1995), die Tatsache an, dass durch die festgelegten Verläufe bzw. Reizdarbietungen zumindest in der Grenz- und Konstanzmethode Zeit und Daten verschwendet werden, da Reaktionen auf Reize, die weit vom Schwellwert entfernt liegen, nicht in die Berechnung mit einfließen. Zusätzlich werden potenzielle Verzerrungen der Schätzwerte nicht berücksichtigt, eine Kontrolle über das subjektive Entscheidungskriterium sowie eine theoretische Beweisführung über wichtige Aspekte der Prozeduren fehlen. Dies dürften mit Grund dafür sein, warum die von Fechner entwickelten Methoden in der modernen Forschung immer wieder überarbeitet wurden, wie im nächsten Abschnitt aufgezeigt wird.

3-1-2-2 Adaptive Ansätze.

Eine zentrale Fragestellung der Psychophysik ist nach wie vor, wie die Wahrnehmung bestimmende Parameter in Abhängigkeit spezifischer physikalischer Reizkombinationen mit möglichst geringem Testaufwand reliabel zu ermitteln sind. Zum einen interessiert dabei entweder die Wahrnehmungsschwelle (RL oder DL) oder zusätzlich die psychometrische Funktion, die neben dem Schwellwert auch Aussagen über die Diskriminierbarkeit (Steigung der Funktion) erlaubt.

Um Schwellwerte oder auch die psychometrische Funktion mit geringem Zeitaufwand zu erfassen, ohne Genauigkeit einzubüßen, wurden adaptive Ansätze entwickelt. Diese erlauben in Abhängigkeit der Antwort des Probanden auf die vorangegangenen Reizpräsentation⁹, den Reiz für das folgende Trial zu ermitteln. Die heutzutage gebräuchlichsten adaptiven Methoden zur Schätzung der Schwellwerte lassen sich in drei Kategorien einteilen (nach Leek, 2001):

- a. Staircase-Methode,
- b. Parameterschätzung durch sequentielles Testen, die sog. PEST-Methode
- c. Maximum-Likelihood-Methode.

⁹ Die für eine Antwort nötigen Reizpräsentationen werden über die Intervalle mit Reizen definiert und kurz als Trial bezeichnet. Im Falle der Absolutschwellenbestimmung wird in der Regel ein Intervall dargeboten, während bei der Erhebung der Unterschiedsschwelle zwei Intervalle nacheinander dargeboten werden.

Die Staircase-Methode. Als einer der Ersten schlug Georg von Békésy (1899-1972) eine Veränderung der Grenzmethode vor, bei der die Reizpräsentation direkt der Antwort des Probanden angepasst wird. Ein großer Nachteil dieser als Békésy-Tracking bekannten Methode ist, dass das Antwortverhalten der Probanden stark beeinflussbar ist: Denn abhängig davon, ob der Proband ein konstantes Antwortkriterium beibehalten kann, wird auch die Schätzung des Schwellwertes mehr oder weniger fluktuieren.

Dixon & Mood (1948) entwickelten das Békésy-Tracking daher zur Staircase-Methode weiter. Diese einfache up-down-Methode reduziert die Reizstärke im folgenden Trial, wenn der Probanden im vorangegangenen einen Unterschied detektiert hatte (Unterschiedsschwelle) oder einen Reiz wahrgenommen hatte (Absolutschwelle), bzw. erhöht sie, wenn kein Unterschied oder kein Reiz wahrgenommen wurde (z.B. Leek, 2001; Kaernbach, 2001; Treutwein, 1995). Der Reizwert, bei dem die Performanz bei 50% liegt, definiert in der Regel die Schwelle. Levitt (1971) stellte dann ein transformiertes Verfahren vor, bei dem nicht der Mittelpunkt der psychometrischen Funktion, sondern der Wert ermittelt wird, bei der die Performanzwahrscheinlichkeit bei auf- und absteigender Reizpräsentation gleich ist. Wird ein höheres Performanzniveau gewünscht, muss lediglich die Art der Richtungsänderung angepasst werden: Über die two-down, one-up-Prozedur wird beispielsweise der Reizwert ermittelt, der mit 70.7% entdeckt bzw. als unterschiedlich erkannt wird (z.B. Levitt, 1971).

Nachteile der transformierten up-down-Methoden sind, dass zum einen keine Reizdarbietungsregel existiert, die auf das 75%-Level konvergiert, und zum anderen ein relativ geringer Wertebereich verlangt wird, um eine Schwellwertermittlung zu ermöglichen (z.B. Leek, 2001; Kaernbach, 1991). Kaernbach (1991) schlägt daher ein gewichtetes Verfahren vor, dem nicht die 1down-1up-Prozedur zugrunde liegt. Sie unterscheidet sich von der einfachen Staircase-Methode durch eine Variation der Schrittweite abhängig von der Richtung der Sequenz und ermöglicht daher, die Performanz für jeden gewünschten Punkt der psychometrischen Funktion zu ermitteln (z.B. Kaernbach, 1991). Bei dieser Methode wird also die Schrittgröße nicht von Vorneherein festgelegt, sondern variiert (z.B. Leek, 2001; für einen Überblick s. a. Macmillan & Creelman, 2005).

Das Hinzufügen der Antwortkategorie „weiß nicht“ (unforced-choice-Methode) zeigt nur einen geringen Vorteil gegenüber dem forced-choice-Paradigma, führt jedoch zu einer größeren Akzeptanz bei den Probanden (z.B. Kaernbach, 2001).

Die PEST-Methode. Die PEST-Methode variiert während des Testens die Schrittweite, d.h. Abstand zwischen zwei Reizwerten, sowie die Richtung, d.h. ob Reize in auf- und absteigende Reihenfolge präsentiert werden. Auf diese Weise wird mit zunehmender Testung die Schrittweite immer geringer und konvergiert somit rascher gegen den Schwellwert. Taylor & Creelman (1967), die als Erste diese Methode beschrieben, definierten anhand der statistischen Bestimmung der Performanz des Probanden auf dem erreichten Testlevel genaue Regeln, wann und mit welcher Schrittweite der nächste Reiz dargeboten und wann die Reizdarbietung beendet werden soll. Als Schwellwert gilt der letzte präsentierte Reiz (z.B. Taylor & Creelman, 1967).

Um einige Unzulänglichkeiten der PEST-Methode abzufangen, wie beispielsweise inadäquate Auswahl des Startreizes oder der Schrittweite, schlug Hall (1981) eine hybride Methode vor, die aus zwei Teststufen besteht: Zuerst wird für die Auswahl der Reize und, um eine minimale Schrittweite zu erreichen, das PEST-Verfahren angewandt, während im Anschluss daran der eigentliche Schwellwert über eine Kurvenanpassung durch Maximum-Likelihood-Methode ermittelt wird. Dies ermöglicht zusätzlich eine Erhebung der Steigung der psychometrischen Funktion.

Die Maximum-Likelihood-Methode. Bei der Maximum-Likelihood-Methode wird nicht nur das jeweilige Antwortverhalten bei vorangegangener Reizpräsentation, sondern die gesamte Testung mit in die Berechnung einbezogen: Nach jeder Antwort nach Reizpräsentation wird

die bestmögliche psychometrische Funktion an die bestehenden Daten angepasst und der als nächstes darzubietende Reiz so ausgewählt, dass die Standardabweichung minimiert wird (z.B. Leek, 2001; Green, 1990). Eine Schätzung der Schwelle über Maximum-Likelihood, die in der Regel bei dem Reizwert angenommen wird, bei der mit 75%-iger Wahrscheinlichkeit richtiger geantwortet wird, verlangt eine Annahme im Voraus über Form und Steigung der anzupassenden Funktion, wobei eine fehlangepasste Funktion zu tolerierbaren Fehlern führt, wenn die angenommene Funktion von der tatsächlichen wenig abweicht (z.B. Green, 1992, 1990; Dai & Green, 1992; Pentland, 1980).

Probleme bei adaptiven Methoden. Obwohl adaptive Methoden in aller Regel eine bedeutende Zeitersparnis liefern, zeigt sich jedoch auch eine Überschätzung der Performanz des Probanden (vgl. Leek, 2001). Shelton, Picardi & Green (1982) erhoben für eine ungefähr gleiche Trialanzahl die Schwellwerte über die drei oben bezeichneten adaptiven Methoden und fanden keinen Unterschied bezüglich des Standardfehlers der Messung wohl aber bezüglich anderer Parameter. Während ein großer Vorteil der Maximum-Likelihood-Methode ist, schon bei weniger als 10 Trials gegen einen Schwellwert zu konvergieren, traten mit einer erhöhten Antworttendenz gewichtige Nachteile auf, v.a. da die Reize in Schwellennähe platziert werden. Sind weniger als 30 Trials zur Schwellenbestimmung erforderlich, sind die über Maximum-Likelihood- und Staircase-Methoden ermittelten Schwellen ebenfalls verzerrt (z.B. Leek, 2001). Für eine zuvor festgelegte Anzahl von Trials, anhand der ein Schwellwert ermittelt werden soll, sind beide Verfahren zur Schwellenerhebung der PEST-Methode überlegen (z.B. Shelton, Picardi & Green, 1982).

Eine klare Überlegenheit eines der adaptiven Verfahren gegenüber den anderen ist abhängig von der zu untersuchenden Fragestellung und muss im Einzelfall überprüft werden. Auch kann zumeist keine klare Ablehnung oder Befürwortung adaptiver Methoden im Vergleich zu den klassischen ausgesprochen werden.

Die unterschiedlichen Fragestellungen, die im Laufe der Arbeit untersucht werden, machen einen mehrfachen Wechsel der Methode erforderlich. Daher wird auf die einzelnen verwendeten psychophysischen Methoden in den jeweiligen Kapiteln näher eingegangen.

3-2 Signalentdeckungstheorie

Eine weitere Methode zur Bestimmung von Schwellen stellt die Signalentdeckungstheorie dar, die sich den Umstand zunutze macht, dass sowohl Erwartung des Probanden als auch Rückmeldung über seine Antwort einen Einfluss auf sein Detektionsverhalten ausüben können (für einen Überblick s. Macmillan & Creelman, 2005; Gescheider, 1985; Velden, 1982; Engen, 1971; Green & Swets, 1966). Bei psychophysischen Experimenten werden Probanden in ihren Urteilen von Faktoren bestimmt, die entweder nicht Ziel der Untersuchung sind (d.h. ihre Fähigkeit Abweichungen zu entdecken oder zu diskriminieren), oder aus Unsicherheit resultieren.

Um die sensorische Leistungsfähigkeit prinzipiell ermitteln zu können, muss der Proband ein Urteil abgeben, muss sich entscheiden, ob er einen Reiz bzw. Reizunterschied wahrgenommen hat, oder nicht. Diese Entscheidung ist nicht nur von der Leistungsfähigkeit seiner Sinnesorgane abhängig, sondern auch von seiner persönlichen Neigung, in Fällen der Unsicherheit tendenziell eher zustimmend oder ablehnend zu antworten. Um mit diesen Reakti-

onsstrategien umgehen zu können, schlugen Tanner & Swets (1954) eine statistische Entscheidungstheorie vor, die *theory of signal detection*, die von Green & Swets (1966) beschrieben wurde und daher an dieser Stelle nicht ausführlich wiederholt zu werden braucht.

Darüber hinaus kann die Signalentdeckungstheorie ebenso herangezogen werden, um neben Aussagen über Schwellwerte Kenntnisse zu erhalten, die über die Fähigkeit des Probanden, Reize zu entdecken oder zu diskriminieren, Aufschluss geben. Wird lediglich ein Reiz pro Durchgang präsentiert, an dessen Ende der Proband entscheidet, ob es sich um ein Trial mit oder ohne Reiz handelte, wird diese Diskriminierungsaufgabe *Detektion* genannt (wovon sich der Name *detection theory* ableitete; vgl. Macmillan & Creelman, 2005). Auf beide Aufgabentypen und deren Implikationen soll in den folgenden Abschnitten näher eingegangen werden.

3-2-1 Detektionsaufgabe

Die Signalentdeckungstheorie geht davon aus, dass Reize (bzw. Signale) immer vor einem Hintergrundrauschen (*noise* N) wahrgenommen werden, so dass der Proband grundsätzlich eine Detektionsaufgabe zu lösen hat. Er entscheidet, ob das sensorische Ereignis auf Signal und Rauschen (SN) oder nur auf Rauschen N zurückzuführen ist. Die Empfindungsstärken von N und SN sind zufällig verteilt (s. Abbildung 3-4). Im Überlappungsbereich der beiden Verteilungsfunktionen um diese Mittelwerte $f(x | N)$ und $f(x | SN)$ können die Ereignisse N und SN nicht eindeutig voneinander unterschieden werden. Der Proband setzt an einer beliebigen Stelle sein Entscheidungskriterium (X_C).

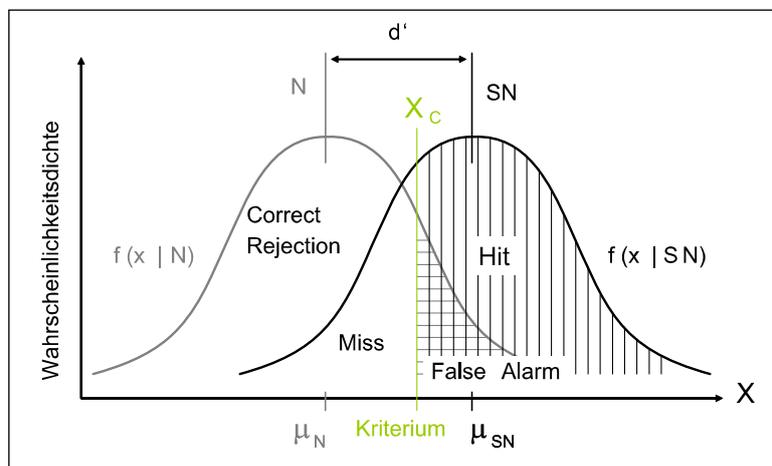


Abb. 3-4 Schematische Darstellung der wichtigsten Parameter der Signalentdeckungstheorie. Signale werden stets vor einem Hintergrundrauschen (N) wahrgenommen (also: SN). N und SN variieren. Der Abstand der beiden Verteilungsfunktionen definiert den Index der Detektabilität d' . Anhand eines Entscheidungskriteriums X_C gibt der Proband an, das Signal wahrgenommen zu haben („ja“) oder nicht („nein“).

Es gibt insgesamt vier mögliche Reaktionen, sich für oder gegen das Vorhandensein eines Signals zu entscheiden (s. Tabelle 3-1).

Entweder wird eine richtige Entscheidung bei vorhandenem Signal ($p(\text{Hit})$) oder beim Fehlen des Signals ($p(\text{CR})$) getroffen, oder ein Signal wird vermutet, obwohl keines vorhanden ist ($p(\text{FA})$), oder ein vorhandenes Signal wird nicht bemerkt ($p(\text{Miss})$).

Tabelle 3-1 Reiz-Reaktionsschema und die bedingten Wahrscheinlichkeiten p nach der Signalentdeckungstheorie bei einem psychophysischen Experiment mit Ja-Nein-Prozedur.

		Reaktion	
		ja	nein
Reiz	SN	Hit $p(\text{ja} \text{SN})$	Miss $p(\text{nein} \text{SN})$
	N	False Alarm FA $p(\text{ja} \text{N})$	Correct Rejection CR $p(\text{nein} \text{N})$

Ein Parameter zur Identifizierung der Sensitivität des Probanden unabhängig von seinem Entscheidungskriterium ist der sog. *Index der Entdeckbarkeit*, der über Mittelwert (MW) und Streuung (σ) der beiden Verteilungen (Signal und Rauschen, Rauschen) definiert ist. Wenn angenommen werden kann, dass beide Verteilungen gleich sind, lässt sich der Index wie folgt berechnen:

$$d' = \frac{MW_{SN} - MW_N}{\sigma_N}.$$

Eine weitere Berechnungsmöglichkeit ergibt sich über die standardisierten (z-transformierten) relativen Häufigkeiten nach der folgenden Formel:

$$\text{bzw.} \quad d' = z(\text{Hit}) - z(\text{FA}) \quad (5).$$

Als weiteres Performanzmaß gilt die Wahrscheinlichkeit $p(c)$, eine korrekte Antwort zu geben: Sie kombiniert das Reaktionsverhalten des Probanden, sowohl einen Reiz richtig (*Hit*) und falsch (*false alarm FA*) als Treffer zu klassifizieren. Dabei gilt, wenn der Anteil von Trials mit SN und N gleich groß ist:

$$p(c) = 0.5(\text{Hit} - \text{FA}) + 0.5 \quad (6).$$

3-2-2 Diskriminierung

Während bei Detektionsaufgaben nach jedem einzelnen Beobachtungsintervall entschieden wird, ob ein Reiz vorhanden war, werden bei Diskriminierungsaufgaben dem Probanden zwei Reize nacheinander präsentiert. Am Trial-Ende gibt der Proband an, in welcher Reihenfolge die Reize dargeboten wurden. Die Wahrscheinlichkeiten, dargestellt in Tabelle 3-1, berechnen sich nun in Abhängigkeit der Antwort (z.B. „Reiz 1 an Position 1“) und entsprechend der Reihenfolge der tatsächlichen Reizdarbietung (z.B. Darbietungssequenz „Reiz 1 – Reiz 2“ entspräche Treffer bzw. „Reiz 2 – Reiz 1“ Fehlalarm).

Der Index der Entdeckbarkeit d' lässt sich wiederum aus diesen beiden Wahrscheinlichkeiten berechnen. Da nun jedoch zwei Intervalle miteinander verglichen werden, muss der Index korrigiert werden:

$$d' = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [z(\text{Hit}) - z(\text{FA})] \quad (7).$$

3-3 Psychophysische Skalierung

Fechner ging davon aus, dass Empfindungen nicht direkt erhoben werden können, dass aber die sensorische Empfindungsgröße direkt aus den Schwellenwerten geschätzt werden kann (für einen Überblick s. Irtel, 2005; Gescheider, 1985; Stevens, 1975; Engen, 1971). Er nahm an, dass mit zunehmendem Reizwert die sensorische Empfindung mit gleicher Schrittweite zunimmt, und sich die sensorische Größe aufgrund eines Reizes so durch Addition aller vorherigen DL-Schritte bestimmen lässt. Für Fechner bildete der DL die Einheit zur Konstruktion der psychophysischen Größenfunktion. Beispiel einer derart konstruierten Skala ist die *dol*-Skala der Schmerzwahrnehmung.

3-3-1 Direkte Skalierung und die Empfindungsstärke

Der Teilnehmer wird aufgefordert, jedem Stimuluswert direkt einen Zahlenwert zuzuordnen. Die so entstehende Funktion zwischen Empfindung und Reizgröße wird psychophysische Größenfunktion genannt. Empfindung und Reizgröße stehen selten in einem direktproportionalen 1:1-Verhältnis. Denn nicht jeder physikalisch doppelt so intensive Reiz (z.B. Helligkeit) wird auch subjektiv doppelt so stark empfunden. Beispielsweise verlangt die Wahrnehmung doppelter Lautstärke eine Verzehnfachung des physikalischen Reizes.

Nach Stevens nimmt die Empfindungsstärke (*engl.* sensation magnitude) als eine Potenzfunktion der physikalischen Größe zu (Steven'sches Potenzgesetz; Stevens, 1975). Anders formuliert: Es sollte eine doppelte Logarithmisierung bei der grafischen Darstellung zu einem linearen Zusammenhang zwischen subjektiver und physikalischer Reizintensität führen. Der Exponent wiederum ändert sich in Abhängigkeit der untersuchten sensorischen Modalität, respektive der Beschaffenheit des Reizes und bestimmt damit die Steigung des Zusammenhangs. Im Spezialfall für $n=1$ ändert sich mit der Reizgröße direkt auch die Empfindungsgröße. Es konnte gezeigt werden, dass das Stevens'sche Potenzgesetz in sehr vielen Bereichen Gültigkeit zeigt. Selbst räumliche und zeitliche Summierung können abgebildet werden (vgl. Marks, 1978).

3-3-2 Methoden der Skalierung

Um quantifizierbare Daten aus den Antworten des Probanden über einen wahrgenommenen Reiz zu erhalten, entwickelte Stevens (1960) unterschiedliche Skalierungsmethoden. Zur Konstruktion psychophysischer Skalen schlug er die *Partition-* und *Magnitude-Skalierung* vor.

Bei Partition-Scaling wird der Proband aufgefordert, die Reize eines Kontinuums in subjektiv gleiche sensorische Intervalle aufzuteilen. Bei der Größenskalierung werden Verhältnisskalen auf der Basis direkter Beurteilung von Verhältnissen erstellt. Da die Größenschätzungsverfahren (Magnitude Scaling) die häufiger verwendeten Verfahren sind, sollen im Folgenden einzelne Verfahren ausführlicher beschrieben werden:

- Herstellungsverfahren (*engl.* magnitude / ratio production), bei der die Reize durch Versuchsleiter oder Proband so manipuliert werden können, dass sie entweder dem Verhältnis eines Referenzreizpaares oder der Größe des Referenzreizes entsprechen,

- Schätzverfahren (*engl.* magnitude / ratio estimation), bei dem Reize direkt in Bezug auf ihr Verhältnis oder ihre Größe eingeschätzt werden.

Magnitude Estimation. Das gebräuchlichste Verfahren direkter Skalierung ist das direkte Einschätzen der Ausprägungsstärke der dargebotenen Reizintensität. Die Probanden werden aufgefordert, die Stärke des wahrgenommenen Reizes in Zahlen (erlaubt sind ganze, Dezimalzahlen oder Brüche) so auszudrücken, dass sie seine Empfindung adäquat wiedergeben. Manchmal wird zusätzlich ein Modulus dargeboten, dem ein fester Zahlenwert zugeordnet wird. Vorteil der Methode ohne Modulus ist, dass die Probanden ihren eigenen Standardreiz setzen können. Aus der Gesamtheit der so gewonnenen, direkten Urteile wird die zentrale Tendenz, welche meist der geometrische Mittelwert oder der Median ist, bestimmt. Auch der Wertebereich auszuwählender Zahlenwerte kann begrenzt werden (z.B. Cohen & Lecci, 2001; Haverland, 1979).

Allgemein bietet nach Marks (1974) das Magnitude-Estimation-Verfahren zwei wesentliche Vorteile: es bietet zum einen Informationen über den Zusammenhang zwischen sensorischer Erfahrung und den Parametern der Stimulation, sowie über die Art ihrer Kovariation „to provide a constant sensory experience“ (Marks, 1974; p.33). Zum anderen können, wie in der klassischen Psychophysik Abweichungen vom Weber'schen Gesetz in Schwellennähe gefunden werden: Mit zunehmender Nähe zum Schwellwert wird eine Abweichung vom linearen Zusammenhang nach dem Stevens'schen Gesetz berichtet.

Cross-modality Matching. Über die direkte Einschätzung der physikalischen Eigenschaft eines Reizes können Informationen über strukturelle Beziehungen gewonnen werden. Da diese Beziehungen nicht nur innerhalb eines Sinnes, sondern auch zwischen den Sinnen gefunden werden konnten, wird in der Forschung angenommen, dass es sich bei dem Stevens'schen Potenzgesetz um ein allgemeines Gesetz handelt. Um das Gesetz überprüfen zu können, soll die in einer Modalität wahrgenommene Intensität eines Reizes, beispielsweise die Helligkeit eines Lichtsignals, durch Veränderung der Intensität eines Reizes in der anderen Modalität, z.B. die Lautheit eines Tons, so hergestellt werden, dass Helligkeit und Lautheit einander subjektiv entsprechen. Diese Methode wird Cross-modality Matching genannt und verlangt die Transformation der in einem Sinn wahrgenommenen Information zur Darstellung in einer anderen.

4 TEIL I MENSCHLICHES AUFLÖSUNGSVERMÖGEN AUSGEWÄHLTER HAPTISCHER REIZE

Mithilfe der im vorangegangenen Kapitel dargelegten Methoden wird es im Folgenden Aufgabe sein, an ausgewählten Beispielen zu untersuchen, wie bestimmte physikalische Parameter haptisch wahrgenommen und aufgelöst werden. Diese verallgemeinerbaren Ergebnisse wiederum können zur Gestaltung der haptischen Kommunikation in TPTA-Systemen herangezogen werden.

Bei der Identifikation von Objekten richten sich Menschen nach Größe und Form (also geometrische Eigenschaften), Temperatur und Textur (also Materialeigenschaften) sowie der Funktion des berührten Gegenstandes (z.B. Klatzky, Lederman & Metzger, 1985). Die einzelnen identifikationsfördernden Eigenschaften lassen sich dabei in Unterkategorien, sog. Dimensionen, einteilen, die von besonderer Bedeutung für die Wahrnehmung sind. Die prominentesten Dimensionen von Oberflächen sind *Rau vs. Glatt* und *Hart vs. Weich* (z.B. Hollins, Bensmaïa, Karlof & Young, 2000; Hollins, Faldowski, Rao & Young, 1993). *Wärme vs. Kälte* konnte in den genannten Studien nicht als eigenständige Dimension bestätigt werden; die thermischen Eigenschaften wurden nicht als unabhängig von Textur bewertet (vgl. Hollins et al., 1993; Hollins et al., 2000). Darüber hinaus konnte eine weitere Dimension identifiziert werden, die sich jedoch bei einer Wiederholung des Experiments als so wenig robust erwies, dass sie entweder den anderen Dimensionen zugeordnet (z.B. Hollins et al., 1993) oder als eigenständige Dimension *Klebrig vs. Rutschig* (z.B. Hollins et al., 2000) benannt werden konnte.

Da sich als stabilste identifikationsfördernde Materialeigenschaften Textur und Nachgiebigkeit erwiesen, werden diese beiden im Folgenden näher betrachtet. Als geometrische Eigenschaft wird die Objektform bzw. die die zweidimensionale Darstellung determinierende Objektkante ausgewählt.

Im folgenden Kapitel wird nun das menschliche Auflösungsvermögen des haptischen Systems anhand von Schwellwerten für diese Objekteigenschaften bestimmt (s. dazu Abbildung 4-1).

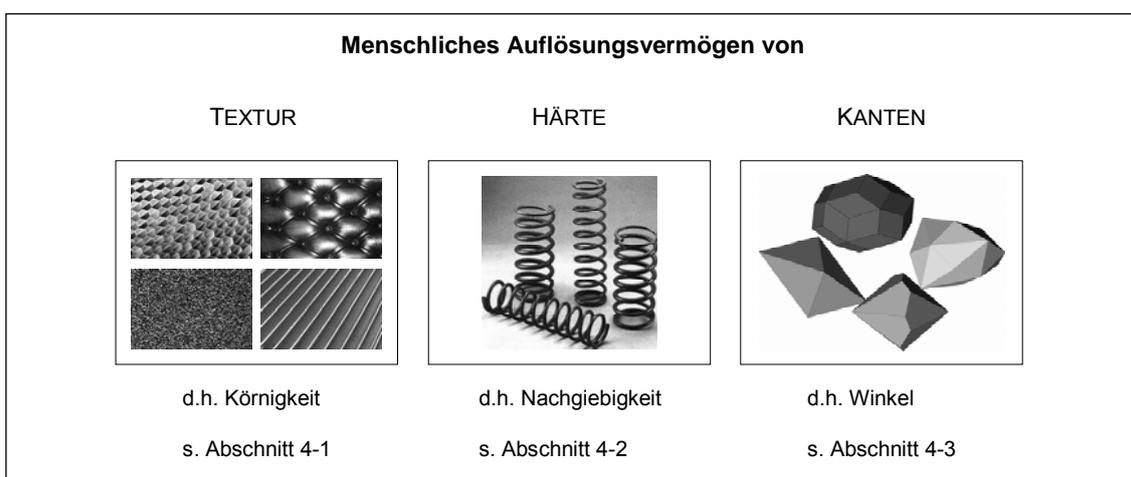


Abb.4-1 Für die aufgezeigten, relevanten Beispiele von Material- und Geometrieigenschaften wird das menschliche Auflösungsvermögen des haptischen Systems in Kapitel 4 bestimmt.

Von besonderem Interesse für die Schwellenerhebung und deren Übertragung auf technische Anwendungen ist grundsätzlich, inwiefern Variationen der Handtemperatur einen Ein-

fluss auf die Wahrnehmung von Materialeigenschaften haben. In Abschnitt 2-1-1-3 wurde bereits auf die Auswirkungen thermischer Stimulation auf die Mechanorezeptoren hingewiesen, wobei diese, wie in Abschnitt 2-4 erläutert, gerade bei der Wahrnehmung von Textur eine besondere Rolle spielen. Auch die Wahrnehmung von Härte kann dergestalt beeinflusst werden.

Für die Schwellenerhebung ist des Weiteren zu berücksichtigen, ob eine gleichzeitig taktile Stimulation das Auflösungsvermögen nachgiebiger Reize beeinträchtigt, und, inwiefern die bereits in Abschnitt 2-3 dargestellten Explorationsbewegungen ein höheres Auflösungsvermögen bedingen, wenn sie aufgabenspezifisch bzw. bezogen auf die Objekteigenschaft, die exploriert werden soll, eingesetzt werden.

4-1 Wahrnehmung von Oberflächentextur

„Ich glaube gefunden zu haben, daß beim Tasten mit bewegtem Tastorgan neben den Druckempfindungen fast immer Vibrationsempfindungen einhergehen und die Tastleistungen mitbestimmen.“

(Katz, 1925, S. 187f)

4-1-1 Theoretischer Hintergrund

Oberflächenrauheit kann definiert werden als bestehend aus „protuberant elements arising from a relatively homogenous substrate“ (Klatzky & Lederman, 2003a, p. 153). Im Allgemeinen beschäftigt sich die Texturforschung mit zwei unterschiedlichen Klassen von Stimuli: Oberflächen mit Rillen oder mit Partikeln. Oberflächen mit Rillen werden meist durch Einfräsungen in ebene Platten hergestellt, während Oberflächen mit Partikeln zumeist aus Oberflächen in Form von Schleifpapier bestehen, welches mit unterschiedlichster Körnung kommerziell erhältlich ist. Variiert werden als Parameter (s. Abbildung 4-2) Partikel- oder Rillenhöhe, Partikel- oder Rillenbreite sowie Partikel- oder Rillenabstand, auch bezeichnet als Interelementspacing (IES).

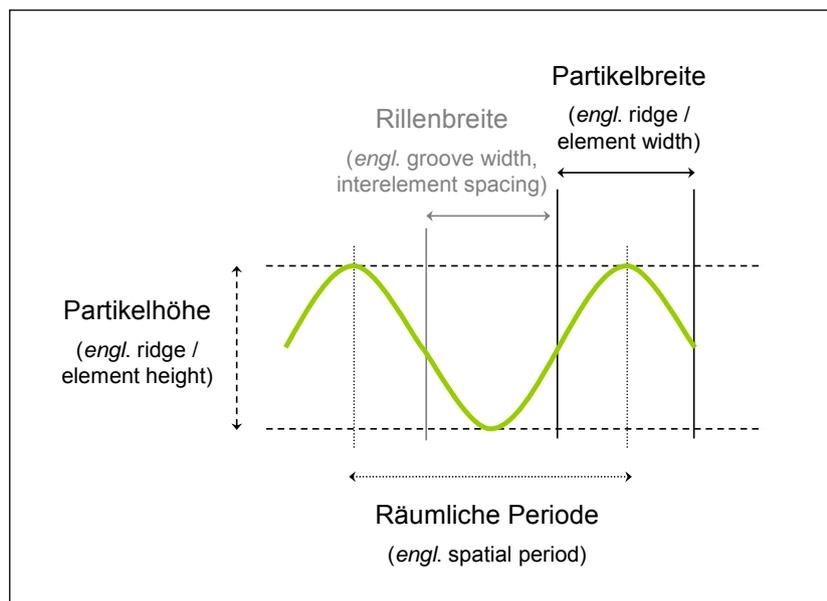


Abb. 4-2 In der Texturforschung werden Texturen standardisiert, indem sie aus gleichmäßigen Rillen oder Partikeln hergestellt werden. Zu variierende Parameter werden an einem Querschnitt erläutert.

Die Wahrnehmung solcher grundlegender Texturen ist (wie in Abschnitt 2-4 bereits zusammengefasst) abhängig von der Variation der oben genannten Parameter und wird von unterschiedlichen Mechanorezeptoren mediiert (s. Abschnitt 2-1-1-1). Textur kann untergliedert werden in Makrotexturen (IES variiert zwischen 0.8 mm und 3 mm) und Mikrotexturen (IES unter 0.8 mm), deren Wahrnehmung v.a. durch räumliche Details und/oder durch Vibrationen, die beispielsweise beim Streichen mit dem Finger über die Oberfläche entstehen oder

durch beides erzeugt werden, wie ausführlich in Abschnitt 2-4 dargestellt wurde. Die Ergebnisse bereits bestehender Forschungsarbeiten zur Diskriminierung von Texturen sowie von (texturunabhängigen) Vibrationen werden im Folgenden kurz zusammengefasst und einander gegenübergestellt.

Menschliches Auflösungsvermögen von Texturen (s. für eine Zusammenfassung Tabelle 4-1). Zur Untersuchung der Textur wurden häufig gekörnte Oberflächen verwendet, die in mehreren Dimensionen variieren, d.h. Schleifpapier (z.B. Miyaoka et al., 1999; Ardila & Uribe, 1987; Jones & O'Neil, 1985; Björkman, 1967). Die bei der Untersuchung verwendeten Proben mit groben Partikelgrößen können dem Makrotexturbereich zugeordnet werden. Hollins et al. (2001) zeigten, dass 12% Unterschiede zwischen Makrotexturen und 40% Unterschiede zwischen Mikrotexturen für die Diskriminierung ausreichte. Miyaoka et al. (1999) fanden, dass Abweichungen von ca. 50% in der Partikelgröße von Schleifpapieren, die Mikrotexturen nachbilden, nötig sind, um unterschieden werden zu können. Darüber hinaus nimmt die Diskriminierungsleistung mit zunehmender Partikelgröße zu (s. Miyaoka et al., 1999).

Wird lediglich die Rillenhöhe bei konstanter Rillenbreite variiert, liegt der Weber-Bruch bei ca. 0.15 (vgl. Nefs, Kappers & Koenderink, 2001; Miyaoka et al., 1999). Die Absolutschwelle für die Wahrnehmung der Partikelhöhe von gekörnten Oberflächen liegt bei ca. 0.16 μm (IES von 1 mm) und für Rillenhöhe bei ca. 0.06 μm (z.B. La Motte & Srinivasan, 1989).

Lamb (1983) variierte die räumliche Dichte von (Makrotextur-) Oberflächen derselben Korngröße und fand, dass lediglich 2% Unterschied im IES nötig waren, um wahrgenommen zu werden. Nur ca. 10% Abweichung der räumlichen Periode der Standardstimuli war für die Unterscheidung nötig (z.B. Nefs, Kappers & Koenderink, 2002, 2001; Sinclair & Burton, 1991).

Tabelle 4-1 Weber-Brüche sowie zugehörige Standardstimuli bei Diskriminierung von texturierten Oberflächen (Schleifpapier, Stimuli mit Rillen oder Punktmuster). Variiert wurde entweder ein Parameter oder (bedingt durch die Reizauswahl) beide.

	Weber-Brüche	Stimulusart	Wertebereich
Variation: Partikelhöhe & -abstand			
Hollins et al. (2001)	0.38 0.12	Schleifpapier	Partikelhöhe: 16, 24, 36, 44, 56, 80 μm Partikelhöhe: 2236, 2340, 3200 μm
Miyaoka et al. (1999)	0.47	Schleifpapier	Gitter: 1200, 2000, 3000, 4000
Jones & O'Neil (1985)		Schleifpapier	Gitter: 80, 100, 120, 150, 180, 220, 240, 280, 320, 400
Morley, Goodwin & Darian-Smith (1983)	0.05	Rillen	Partikelhöhe: 770, 1200 μm
Björkman (1967)		Schleifpapier	Gitter: 36, 50, 80, 120, 180, 240, 320
Variation: Partikelhöhe			
Nefs et al. (2001)	0.15	Rillen	Räuml. Periode: 0.05, 0.1, 0.2 mm
Miyaoka et al. (1999)	0.14	Rillen	Partikelhöhe: 0.5 μm
Variation: Partikelabstand			
Nefs et al. (2002)	0.11	Rillen	0.25, 0.5, 1, 4 Linien/cm
Nefs et al. (2001)	0.09	Rillen	0.25, 0.5, 1 Linien/cm
Sinclair & Burton (1991)	0.12	Rillen	0.75, 1.25, 1.75, 2 mm
Lamb (1983)	0.02	Partikel	2 mm

Im Gegensatz zum relativ hohen Auflösungsvermögen von Texturen (s. Tabelle 4-1) sind für eine Detektion größere räumliche Abstände bei einer Zwei-Punkt-Stimulation nötig: Der geringste Abstand zweier Punkte, der gerade noch wahrgenommen werden kann, wird als Zweipunktschwelle bezeichnet. Weinstein (1968) bestimmte die Schwelle (Kontaktfläche 2.3 mm²) für unterschiedliche Körperregionen und fand für den Zeigefinger eine minimal detektierbare Abweichung der Punktstimulation von 2.5 mm. Schmidt (1973) gibt die statische simultane Raumschwelle bei 2.25 mm beim Erwachsenen an.

Dem entgegen zeigten Johnson & Phillips (1981), dass bei Bewegung der Texturen Unterschiede im IES von weniger als 0.5 mm zwar wahrnehmbar, ab 0.8-0.9 mm voneinander unterschieden werden können, aber erst ab 2-3 mm als distinkt wahrgenommen werden; Rillen schienen dabei leichter zu diskriminieren zu sein als Partikel. Auch eine zusätzliche Bewegung der Pins führt zu einer Reduzierung der Zweipunktschwelle (z.B. Perez, Holzman & Sandoval, 1998).

Menschliches Auflösungsvermögen von Vibrationen. Der durchschnittliche Weber-Bruch für die Diskriminierbarkeit vibrotaktile Amplituden liegt bei ca. 0.10-0.40, und dies relativ unabhängig von Frequenzen in einem Bereich zwischen 25-200 Hz (z.B. Rinker, Craig & Bernstein, 1998; Goble, Collins & Cholewiak, 1996; La Motte & Mountcastle, 1975; Craig, 1974, 1972; Goff, 1967; vgl. auch Gescheider, Bolanowsky, Verrillo, Arpajian & Ryan, 1990).

Anders ist die Absolutschwelle für vibrotaktile Intensität von der Frequenz der Vibration abhängig, hat ihr Minimum bei Frequenzen zwischen 200-400 Hz und steigt mit zunehmenden, respektive abnehmenden Frequenzen an (z.B. Goble et al., 1996; Lamoré, Muijser & Keemink, 1986; Verrillo, 1985, 1963; Greenspan, Kenshalo & Henderson, 1984; Goff, 1967; Geldard, 1940; Hugony, 1935). Eine Erhöhung des Fingerdrucks reduzierte die Absolutschwelle für Amplituden von Vibrationen zwischen 1-200 Hz (s. Makous, Gescheider & Bolanowski, 1996).

Für konstante Standardamplituden (20 bzw. 35 dbSL) lässt sich gleichfalls eine Tendenz der Abhängigkeit von Amplitudendiskriminierungsschwelle und Frequenzband finden: Die JND-% liegen bei ca. 20% im niederfrequenten Bereich bis 50 Hz (z.B. Goble et al., 1996; La Motte & Mountcastle, 1975; Goff, 1967) und steigen im hochfrequenten Bereich über 100 Hz auf 30-40% (z.B. Greenspan et al., 1984; Goff, 1967).

Die menschliche Unterscheidungsfähigkeit für vibrotaktile Frequenzen zwischen 1 bis 256 Hz liegt bei 3-10% Unterschied von der Standardfrequenz (z.B. Rinker et al., 1998; Sinclair & Burton, 1996; Steinmetz, Romo & Mountcastle, 1989; La Motte & Mountcastle, 1975; Rothenberg, Verrillo, Zahorian, Brachman & Bolanowski, 1977; Franzén & Nordmark, 1975; Goff, 1967) bzw. 20-38% bei 25-500 Hz (z.B. Pongrac, 2006; Goff, 1967). Dabei zeigt sich in der Regel eine Unabhängigkeit vom Frequenzspektrum.

Einfluss der Hauttemperatur. Der Einfluss der Hauttemperatur auf die Mechanorezeptoren wurde bereits in Abschnitt 2-1-1-3 beschrieben: Eine Variation der Hauttemperatur modifiziert den Erregungsprozess der Pacini- und Ruffini-Körperchen sowie der Merkel-Zellen.

Bei zahlreichen unterschiedlichen Aufgaben konnte ein Einfluss der Hauttemperatur nachgewiesen werden (s. Larkin & Reilly, 1986; Fischer, 1937; Bellows, 1937; Moore, 1910), u.a. auf die Diskriminierungsfähigkeit von Vibrationen (z.B. Bolanowski et al., 1988; Bolanowski & Verrillo, 1982; Gescheider, Thorpe, Goodarz & Bolanowski, 1997; Verrillo & Bolanowski, 1986; Green, 1977; Weitz, 1941) oder auf die Detektierbarkeit von Druck (z.B. Stevens, Green & Krimsley, 1977; Provins & Morton, 1960; Allers & Halpern, 1921).

Wird die Haut auf Temperaturen unter 25°C adaptiert, reduziert sich die Unterscheidungsfähigkeit für hochfrequente Vibrationen (s. Verrillo & Bolanowski, 2003, 1986; Gescheider et al., 1997; Green, 1977; Weitz, 1941) und Druck (z.B. Stevens et al., 1977; Provins & Morton, 1960; Allers & Halpern, 1921).

Eine Erhöhung der Hauttemperatur auf Temperaturen von 35-38°C führt zu optimaler Wahrnehmbarkeit (z.B. Green, 1977; Weitz, 1941; Bellows, 1937; Moore, 1910;), während eine weitere Erhöhung auf 40-42°C erneut zu einer Abnahme der Absolutschwelle für Amplitude hochfrequenter Vibrationen (vgl. Bolanowski et al., 1988; Bolanowski & Verrillo, 1982; Weitz, 1941) sowie der Druckschwelle führt (z.B. Stevens, Green & Krimsley, 1977; Allers & Halpern, 1921).

Die Absolutschwelle für Amplitude niederfrequenter Vibrationen ist temperaturunabhängig (vgl. Verrillo & Bolanowski, 2003, 1986; Gescheider et al., 1997; Larkin & Reilly, 1986; Green, 1977).

Nur wenige Studien untersuchten die Temperaturabhängigkeit der Unterschiedsschwelle: Fischer (1937) fand keinen Einfluss auf die Unterschiedsschwelle für Amplitudendiskriminierung bei 200 Hz; Gescheider et al. (1997) berichten nur von einem Effekt bei Kühlung der Haut für die Amplitudendiskriminierungsleistung bei 250 Hz Vibrationen.

Offene Fragestellungen. Ca. 2-12% Unterschied in der räumlichen Frequenz können bei der Exploration gekörnter oder gerillter Oberflächen voneinander unterschieden werden (vgl. Nefs et al., 2002; Sinclair & Burton, 1991; Lamb, 1983), während ca. 15% Unterschied in der Partikelhöhe zur Unterscheidung nötig sind (z.B. Nefs et al., 2001; Miyaoka et al., 1999). Es liegen nur wenige Studien zu einem breiten Bereich texturierter Standardstimuli vor (vgl. Hollins et al., 2001).

Die Ergebnisse zur Diskriminierung von Textur stehen in Zusammenhang zu den psychophysischen Befunden zur Unterscheidbarkeit vibrotaktile Amplituden (abhängig vom Frequenzbereich: 20% niederfrequente, 30-40% hochfrequente Vibrationen) oder Frequenzen (ca. 10% vs. 20-30%).

Es wird angenommen, dass bei Exploration texturierter Oberflächen durch laterale Bewegung als adäquate Explorationsprozedur (s. Abschnitt 2-3) die Unterschiedsschwellen abhängig von der Texturart (Mikro- vs. Makrotextur) sind und den Unterschiedsschwellen der Vibrationen entsprechen. Wird demzufolge mit konstanter Geschwindigkeit über die texturierte Oberfläche gestrichen, werden Vibrationen erzeugt, die von unterschiedlichen Mechanorezeptoren dekodiert werden: Meissner-Körperchen sollten demzufolge auf niederfrequente Vibrationen und grobkörnige Oberflächen und Pacini-Körperchen auf hochfrequente Vibrationen und feinkörnige Oberflächen reagieren (vgl. La Motte & Mountcastle, 1975).

Hypothese I-1: Bei Exploration durch laterale Bewegung ist der Weber-Bruch abhängig von der Standardtextur.

Nach der Duplex-Theorie der Texturwahrnehmung (s. ausführlich in Abschnitt 2-4 beschrieben) sind an der Wahrnehmung von Makrotexturen v.a. die Merkel-Zellen beteiligt, d.h. besonders die räumliche Struktur der Textur steht im Vordergrund. Daher wird darüber hinaus erwartet, dass bei Exploration der Oberflächen durch Ausüben von Druck v.a. die Merkel-Zellen angesprochen werden und daraus folgend, die Unterscheidbarkeit für Makrotexturen höher ist als für Mikrotexturen. Zudem wird erwartet, dass der Weber-Bruch mit zunehmender Annäherung an die Schwelle abnimmt.

Hypothese I-2: Bei Exploration durch Ausüben von Druck ist der Weber-Bruch im Makrotexturbereich hoch und nimmt mit zunehmender räumlicher Periode ab.

Ferner sollte der JND-% für Makrotexturen bei Ausüben von Druck im Gegensatz zur lateralen Bewegung höher sein (z.B. Johnson & Lamb, 1981), während erwartet wird, dass der Weber-Bruch für Mikrotexturen bei lateraler Bewegung der Exploration durch Ausüben von Druck überlegen ist.

Hypothese I-3: Der Weber-Bruch ist abhängig von der Explorationsmethode und der Standardtextur.

Der Einfluss der Hauttemperatur auf die Unterscheidungsfähigkeit wurde hinreichend gezeigt: Dabei findet sich v.a. eine Erhöhung der Schwelle bei Kühlung und eher unsystematische Effekte bei Erwärmung der Haut. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit der in Abschnitt 2-1-1-3 berichteten Temperaturabhängigkeit der Mechanorezeptoren: Abweichungen der Hauttemperatur von der Normaltemperatur resultierten in einer Reduzierung der Diskriminierungsfähigkeit (z.B. Stevens et al., 1977; Weitz, 1941). Da für die Wahrnehmung dieser taktilen Reize Pacini-Körperchen und Merkel-Zellen verantwortlich sind, die auch bei der Texturwahrnehmung beteiligt sind, wird ein Einfluss der Temperatur auch auf die Texturwahrnehmung erwartet.

Hypothese I-4: Kühlung wie Erwärmung der Finger führt zu einer generellen Abnahme der Diskriminierungsfähigkeit von Texturen.

Aufgrund der differentiellen Beiträge der Mechanorezeptoren bei der Texturwahrnehmung sowie deren Temperaturabhängigkeit, wird ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Texturtyp besonders bei Exploration durch laterale Bewegung erwartet.

Hypothese I-5: Bei Exploration durch laterale Bewegung ist die Abnahme der Diskriminierungsfähigkeit von Texturen durch Variation der Fingertemperatur am stärksten bei Mikrotexturen.

Hypothese I-6: Bei Exploration durch Ausüben von Druck ist der Einfluss von Kühlung der Finger am stärksten im Bereich außerhalb des Auflösungsvermögens der Merkel-Zellen (Mikrotexturen).

4-1-2 Methode

Stimulusmaterial. Um den Einfluss von Explorationsmethode und Fingertemperatur in Abhängigkeit eines möglichen breiten Wertebereichs zu erfassen wurden als Texturen unterschiedlicher räumlicher Perioden kommerziell erhältliche Schleifpapiere ausgewählt (Gittermuster zwischen 30 und 1.200). Die räumliche Periode der Schleifpapiere wurde errechnet über die Maschengröße (*engl.* mesh): Die handelsüblich angegebene Maschenbreite von 1 inch (25.4 mm) wurde nach Anhang A1 und A2 auf 16.2 mm korrigiert (s. Tabelle 4-2A). Zusätzlich wurden sieben weitere, gröbere Texturproben hergestellt. Sie wurden durch Variation der Menge von speziellem Sand in Kubikzentimeter, die auf einer Trägerfläche von 9.0 x 9.5 cm gleichmäßig verteilt und geklebt wurde, produziert. Im Gegensatz zu den handelsüblichen Schleifpapieren weist der als Sand verwendete Aquarienkies eine relativ homogene Korngröße von durchschnittlich 0.15-0.2 mm auf. Variationen der Kiesmenge über die Probenfläche resultierten demzufolge v.a. in einer unterschiedlichen Streubreite der Körner, nicht jedoch, wie bei dem Schleifpapier in einer zusätzlichen Variation der Partikelhöhe. Die räumliche Periode wurde über die mittlere Kornzahl pro 10 mm bestimmt (s. Anhang A3) und kann in Tabelle 4-2B abgelesen werden.

Alle Texturen wurden auf Holzplatten von 10 x 10 cm geklebt, um ein schnelles Austauschen der Reizproben zu ermöglichen (s. Abbildung 4-3B). Zum Explorieren wurden die Reizproben in einen Rahmen gesteckt (s. Abbildung 4-3C), der gleichzeitig als Begrenzung der zu untersuchenden Fläche durch laterale Bewegung diente: Die maximal zu explorierende Länge durch laterale Bewegung betrug 8 cm.

Die Auswahl der Standardstimuli orientierte sich an der Absolutschwelle für die Wahrnehmung von Oberflächenkörnigkeit in Abhängigkeit von der Explorationsmethode, bei einer Fingertemperatur von 34°C. In einer Voruntersuchung wurden Absolutschwelle für eine räumliche Periode von 0.04 mm bei lateraler Bewegung und von 0.09 mm bei Ausüben von Druck ermittelt (Homann, 2005). Da einige Probanden beim Explorieren der Reizprobe durch laterale Bewegung auch Texturen mit einer räumlichen Periode von 0.03 mm noch wahrnehmen konnten, wurden als Standardreize für diese Explorationsbewegung Standardtexturen von 0.03, 0.05, 0.11, 0.27 und 1.43 mm ausgewählt. Für Ausüben von Druck wurden die Absolutschwelle von 0.09 mm sowie 0.14, 0.27 und 1.43 mm ausgewählt.

Tabelle 4-2 Texturen, die als Stimuli verwendet wurden: A) Schleifpapiere mit ihrer herkömmlichen Bezeichnung (Gittermuster bzw. Mesh) und der korrespondierenden räumlichen Periode (RP); B) durch Variation der Kiesmenge produzierten größeren Texturen und der daraus sich ergebenden räumlichen Periode (RP). Fettgedruckte Stimuli wurden durch seitliche Bewegung, in kursiv gedruckte durch Ausüben von Druck und grau unterlegte durch beide Explorationsarten untersucht.

A) Schleifpapier							
Mesh	1200	800	600	400	320	240	180
RP [mm]	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09
Gittermuster	150	120	100	80	60	40	30
RP [mm]	0.11	0.14	0.16	0.20	0.27	0.41	0.54
B) Zusätzlich durch Variation der Kiesmenge produzierte Texturen							
Kiesmenge [cm ³]	7	6	5	4	3	2	1
RP [mm]	1.38	1.43	1.54	1.60	1.82	2.11	2.22

Versuchsaufbau. Um visuelle Reize aus der Umgebung zu minimieren, wurde eine Experimentalbox in Anlehnung an Lederman & Abbott (1981) konstruiert (s. Abbildung 4-3A), in die die Probanden ihre Hand strecken konnten. Ein Vorhang verhinderte die Sicht auf die gekörnten Texturen (Reizproben). Die Reizproben wurden in einem Winkel von 45° (vgl. Brown, 1960) präsentiert. Die in Abbildung 4-3C dargestellte bewegliche Platte ermöglichte einen schnellen Wechsel der zu explorierenden Texturen innerhalb eines Trials. Die Rahmen dienten neben der Befestigung der Reizproben dazu, die Startposition sowie eine Begrenzung für die Exploration durch seitliche Bewegung zu definieren. In Abbildung 4-3D ist das Temperaturdisplay, welches eine thermostatisierte konstante Fingertemperatur während der Testung gewährleistete, mit seiner Reglereinheit dargestellt.

Das Temperaturdisplay wurde mit einer Fläche von 14 x 12 cm auf Peltier-Elementbasis konstruiert. Hierzu wurde eine Kupferplatte (5 mm Dicke) dicht, d.h. mit engem thermischen Kontakt, auf das 5 x 5 cm Peltierelement (Leistung 60 W, Temperaturrange -50 bis +50°C) gefügt. Die Oberflächentemperatur dieses thermalen Blocks wurde durch einen PTC-Temperatursensor, einen kommerziell erhältlichen PID-Kontroller, geregelt. Dieses Temperaturdisplay erlaubt die Adaptation einer größeren Hautfläche als allein der Fingerspitze. Dadurch wird gewährleistet, dass auch beim Testen der Texturen die Fingerspitze die Temperatur beibehält (s. Abschnitt 2-4).

Mittels eines Temperaturfühlers (Typ GMH 3710, GREISINGER electronic GmbH) wurde die Fingertemperatur zusätzlich überwacht. Dies war erforderlich, da die Raumtemperatur nur bei einer Experimentalgruppe konstant gehalten werden konnte (konstant auf 22°C). Bei den anderen Gruppen kann nicht von konstanten Raumtemperaturverhältnissen ausgegangen werden; deshalb wurde die Temperatur zusätzlich mitprotokolliert. Um zusätzliche auditive Reize aus der Umgebung, wie z.B. die Geräusche, die beim Austauschen und Darbieten der Texturproben entstehen können, auszuschalten, wurde den Probanden über geschlossene Kopfhörer Weißes Rauschen während der gesamten Testzeit dargeboten. Ausschließlich die Reizpräsentationsabfolge wurde über zusätzliche auditive Signale eingespielt.

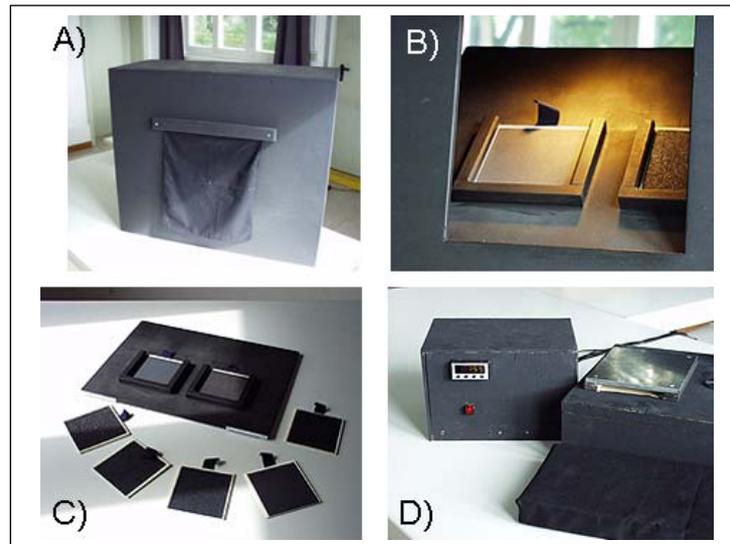


Abb. 4-3 Experimenteller Aufbau: A) Experimentalbox mit verdeckter Handöffnung, B) Blick auf die Reizproben hinter dem Vorhang, C) Reizproben und Aufnahmeplatte, D) Temperaturdisplay zur Kontrolle der Fingertemperatur.

Versuchsdesign. Die aufgrund der Fragestellungen zu manipulierenden Faktoren sind: *Explorationsmethode* (Ausüben von Druck und Laterale Bewegung), *adaptierte Handtemperatur* (normal, reduziert, erhöht) sowie die *Standardtextur*, deren Einfluss auf die Weber-Brüche untersucht werden soll. In Anlehnung an die Literatur (s. Abschnitt 4-1-1) wurden als Fingertemperaturen 20°C und 37°C ausgewählt; die Normaltemperatur liegt bei 32-34°C (s. Abschnitt 2-5).

Explorationsmethode sowie Fingertemperatur wurden aus ökonomischen Gründen als Zwischengruppen festgelegt. Standardtextur war Innersubjektfaktor und unterschied sich, wie oben bereits beschrieben, für die beiden Explorationsgruppen. Aufgrund der Absolutschwelle betrug die räumliche Periode der Texturen in Gruppe P (Ausüben von Druck) 0.09, 0.14, 0.27 und 1.43 mm, für die Gruppe LM (Laterale Bewegung) 0.03, 0.05, 0.11, 0.27, 1.43 mm.

Experimenteller Ablauf. Die Versuchsteilnehmer nahmen an dem Experimentiertisch Platz, auf dem Experimentierbox und daneben das Temperaturdisplay aufgestellt war. Sie wurden instruiert, innerhalb einer Sekunde die Oberflächentextur entweder durch einmaliges Streichen über die Oberfläche (Gruppe LM) oder durch einmaliges Ausüben von Druck (Gruppe P) zu untersuchen. Die durch seitliche Bewegung erzeugte Geschwindigkeit betrug demzufolge ca. 80 mm/s. Da die durch die Probanden aufgewandten Kräfte laut Literatur (z.B. Darian-Smith & Oke, 1980; Lederman & Taylor, 1972) keine oder nur eine geringe Rolle bei der Wahrnehmung der Oberflächentextur spielen, wurden die Kräfte nicht kontrolliert. Die Probanden wurden instruiert, stets über alle Oberflächen eine ähnliche, leichte Kraft auszuüben. Vor dem eigentlichen Testen hatten die Probanden Gelegenheit, sich mit dem Experimentalablauf vertraut zu machen. Im Anschluss an das Training wurden die Finger der dominanten Hand an die entsprechende Fingertemperatur (20°C, 34°C, 37°C) adaptiert. Das Temperaturdisplay wurde so neben der Experimentalbox aufgestellt, dass die Probanden es mit ihrer dominanten Hand leicht erreichen konnten. Die Adaptationszeit betrug mindestens 5 Minuten (z.B. Schmidt & Thews, 1983). Der Finger befand sich pro Trial ca. 4 s entfernt von der Thermalplatte und wurde für 5 s nach jedem Trial readaptiert. Die Fingertemperatur wurde protokolliert.

Die Dauer der Reizpräsentation wurde durch Töne signalisiert. Reize wurden für 1 s dargeboten; das Interstimulus-Intervall betrug 2 s. Das Intertrial-Intervall wurde auf 5 s erhöht, um

eine Readaptation der Fingerspitze zu ermöglichen. Tonsignale und Weißes Rauschen wurden den Probanden über geschlossene Kopfhörer präsentiert, um eine Ablenkung durch die Geräusche, die beim Verschieben der Experimentalplatte entstanden, zu verhindern.

Am Ende eines Trials, wurde der Teilnehmer aufgefordert, beide nacheinander präsentierten Oberflächentexturen bezüglich ihrer Körnigkeit zu beurteilen und anzugeben, ob sie einen Unterschied (ja, nein) in der Körnigkeit und insbesondere im Abstand der Körner voneinander feststellen konnten.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Die Unterschiedsschwellen wurden getrennt für alle Standardreize innerhalb der Temperatur- und Explorationsgruppen erhoben. Das Verfahren zur Erhebung des DL unterschied sich für die Gruppen mit adaptierter auf 34°C Fingertemperatur und die beiden Gruppen 20°C und 37°C. Bei Gruppe 34°C wurde ein zweistufiges adaptives Verfahren gewählt: Mithilfe der PEST-Methode wurde die Schwelle schnell approximiert, nach ca. 6 Trials begann die Staircase-Methode (s. Abschnitt 3-1-2-2). Wenn der Schwellwert 6 Mal erreicht wurde, wurde das Verfahren beendet. Der Schwellwert war als letzter dargebotener Reiz definiert (vgl. Leek, 2001). Die Reihenfolge der Standardwerte innerhalb einer Testsitzung, wie auch die Position des Standardwertes innerhalb der Bestimmung einer Unterschiedsschwelle, wurde randomisiert. Um die Testzeit für Gruppe LM zu reduzieren, wurden zwei Untergruppen getestet, die jedoch, da sie sich nicht unterschieden, im Folgenden als eine Gruppe behandelt werden (vgl. Freyberger & Färber, 2006). Da sich die Kombination der beiden Methoden für die begrenzte Stimulusanzahl als nicht rentabel erwies, wurde für die Schwellenerhebung der Gruppen 20°C und 37°C die klassische Grenzmethode herangezogen (s. Abschnitt 3-1-2-1). Auch sie erlaubt ein relativ schnelles und genaues Approximieren der Schwelle. Das Annähern der Schwelle in auf- und absteigenden Sequenzen wurde jeweils viermal wiederholt. Die Sequenzen endeten nach zwei positiven (absteigend) bzw. zwei negativen (aufsteigend) Antworten. Reihenfolge der Sequenzen in Abhängigkeit der Standardreize sowie des Sequenztyps (auf-, absteigend) wurde randomisiert. Desgleichen wurde die Position des Standardwertes innerhalb eines Trials zufällig dargeboten. Unterschiedsschwelle war der Mittelwert der Umkehrpunkte. Dies entspricht damit in beiden Fällen der Wahrscheinlichkeit, in 50% der Darbietungen des Reizpaars den Unterschied wahrnehmen zu können.

Statistische Analyse. Als erstes wurde überprüft, ob die Kontrolle der Fingertemperatur effektiv war. In einem zweiten Schritt wurden individuelle Unterschiedsschwellen (DL) in Weber-Brüche umgerechnet und die Daten deskriptiv dargestellt (s. Abschnitt 4-1-3-3).

In nach Explorationsgruppen getrennten Varianzanalysen (ANOVAs) mit dem Messwiederholungsfaktor *Standardtextur* sowie dem Gruppenfaktor *adaptierte Fingertemperatur*, wurde der Einfluss der Fingertemperatur sowie der Standardtextur auf den Weber-Bruch ermittelt (s. Abschnitt 4-1-3-4). Um den Einfluss der *Explorationsmethode* testen zu können, wurde eine Teilstichprobe ausgewählt: Texturen mit der räumlichen Periode von 0.27 mm wurden für den Mikrotextrbereich und Texturen mit räumlichen Perioden von 1.43 mm für den Makrotextrbereich herangezogen, da diese Texturen in beiden Gruppen exploriert worden waren. Die Werte entsprechen der Definition für Mikro- bzw. Makrotexturen (s. Abschnitt 4-1-1), die ab Werten größer respektive kleiner 1-0.8 mm getrennt werden (z.B. Johnson & Phillips, 1981). Eine dreifaktorielle ANOVA prüfte den Einfluss von Explorationsmethode, Texturtyp und Fingertemperatur auf die Weber-Brüche (s. Abschnitt 4-1-3-5). Alle F-Statistiken der ANOVA wurden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert (s. Greenhouse & Geisser, 1959). Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgesetzt.

4-1-3 Experimentalblock I – Auflösungsvermögen von Oberflächentextur

4-1-3-1 Stichprobe

Am Experimentalblock I „Auflösungsvermögen von Oberflächentextur“ nahmen 66 Studenten der Universität der Bundeswehr München teil. 6 Personen mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden: 5 aus Gruppe 34°C, 1 Person aus Gruppe 37°C; da für sie die Bestimmung der Schwellwerte unmöglich war. Jeweils 10 Probanden wurden einer der 6 Gruppenbedingungen zugewiesen:

Die Fingertemperatur wurde bei 21 von ihnen (18 Männer, 3 Frauen) an 34°C (normale Fingertemperatur) adaptiert. 11 Männer und 3 Frauen (im Mittel 24 Jahre alt) untersuchten die Texturen durch laterale Bewegung (Gruppe LM), die restlichen 7 Männer (im Mittel 23 Jahre alt) die Texturen durch Ausüben von Druck (Gruppe P).

Bei 20 Personen wurde die Fingertemperatur an 20°C adaptiert; 5 Männer und 5 Frauen untersuchten die Texturen durch Ausüben von Druck (Gruppe P), die anderen 5 Männer und 5 Frauen wurden zufällig der Gruppe LM zu gewiesen. Das mittlere Alter beider Gruppen betrug je 23 Jahre.

Die Fingertemperatur der verbleibenden Testpersonen wurde an 37°C adaptiert: 7 Männer und 2 Frauen partizipierten in Gruppe LM, 7 Männer und 3 Frauen in Gruppe P. Das mittlere Alter in Gruppe LM lag bei 25 Jahren und bei 24 Jahren in Gruppe P.

4-1-3-2 Kontrolle der adaptierten Fingertemperatur

Die Temperatur im Versuchsraum betrug im Mittel 20°C (Standardabweichung $sd = 1.5^\circ\text{C}$). Nach Adaptation und Testung betrug die manipulierte Fingertemperatur in Gruppe LM 22°C (adaptiert an 20°C), 34°C (adaptiert an 34°C) und 38°C (adaptiert an 37°C) und in Gruppe P 26°C (adaptiert an 20°C), 34°C (adaptiert an 34°C) und 36°C (adaptiert an 37°C). Die Unterschiede bei Adaptation an 20°C zwischen den beiden Explorationsgruppen (P, LM) weichen statisch nicht bedeutsam (Mann-Whitney $U=20.5$, $p=0.135$), wenn auch deskriptiv, voneinander ab.

Die gemessene Fingertemperatur unterschied sich statisch signifikant über alle drei manipulierten Temperaturbedingungen, sowohl wenn mit seitlicher Bewegung exploriert wurde ($\chi^2=27.1$, $p<0.001$), als auch wenn durch Ausüben von Druck exploriert wurde ($\chi^2=18.9$, $p<0.001$). Einzelvergleiche über Mann-Whitney U-Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen allen drei Temperaturen innerhalb jeder Explorationsgruppe.

Die Variation der Fingertemperatur unterscheidet sich nicht zwischen den beiden Explorationsgruppen, jedoch in Abhängigkeit der über das Temperaturdisplay dargestellten Temperatur; die Fingertemperatur wurde demzufolge erfolgreich und in der gewünschten Weise variiert.

4-1-3-3 Explorieren durch Laterale Bewegung

Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche. In Tabelle 4-3 sind Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (sd) der Weber-Brüche in Abhängigkeit des Gruppenfaktors Fingertemperatur sowie der Standardtextur zusammengestellt. Bei normaler Fingertemperatur können Unterschiede um 30-40% in der Oberflächentextur voneinander unterschieden werden. Das

Optimum der Wahrnehmung von Oberflächentextur liegt bei Standardtexturen mit räumlichen Frequenzen von 0.11 und 1.43 mm.

Wie in Abbildung 4-4A ersichtlich, zeigt sich eine Abhängigkeit von der adaptierten Fingertemperatur: Der Weber-Bruch verdoppelt sich bei Kühlung oder Erwärmung der Fingertemperatur, zeigt dennoch aber dieselben Optima wie bei normaler Fingertemperatur. Lediglich die Wahrnehmung von Texturen mit räumlicher Periode von 1.43 mm scheint temperaturunabhängig.

Tabelle 4-3 Laterale Bewegung (Gruppe LM) – Einfluss der Fingertemperatur (20°C, 34°C, 37°C) auf die Weber-Brüche in Abhängigkeit der räumlichen Periode (RP) der Standardtextur.

räumliche Periode:	Fingertemperatur					
	20°C		34°C		37°C	
	MW	sd	MW	sd	MW	sd
0.03 mm	0.80	0.39	0.34	0.12	1.11	0.56
0.05 mm	0.73	0.28	0.46	0.08	0.74	0.21
0.11 mm	0.19	0.09	0.14	0.07	0.34	0.23
0.27 mm	0.59	0.11	0.36	0.07	0.62	0.07
1.43 mm	0.26	0.06	0.21	0.06	0.23	0.07

Testen der Hypothesen. In Tabelle 4-4 sind die Ergebnisse der ANOVA zusammengestellt. Alle Effekte werden statistisch signifikant. Die höchsten Effektstärken weisen die beiden Haupteffekte auf¹⁰. Die Variation der Standardtextur beeinflusst die Weber-Brüche. Bonferroni-post-hoc Tests zeigen, dass die Diskriminierungsfähigkeit signifikant geringer ist bei Texturen mit räumlichen Perioden von 0.11 mm und 1.43 mm im Vergleich zu allen anderen Standardtexturen (p -Werte < 0.01). Alle anderen Mittelwerte unterscheiden sich nicht signifikant (vgl. auch Abbildung 4-4A).

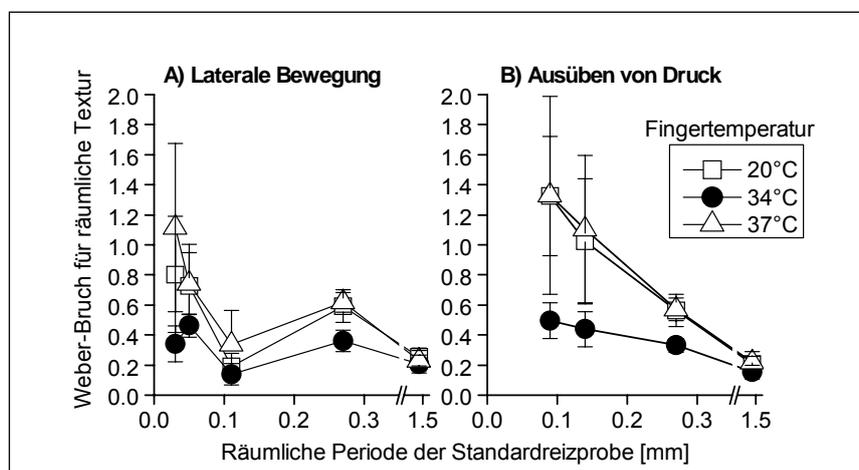


Abb. 4-4 Weber-Brüche in Abhängigkeit der adaptierten Handtemperatur, der räumlichen Periode der Standardtextur sowie der Explorationsmethode durch A) Seitliche Bewegung mit einer durchschnittlichen Explorationsgeschwindigkeit von 80mm/s und B) durch Ausüben von Druck.

Variationen der Fingertemperatur beeinflusste das taktile Auflösungsvermögen, wie auch in Abbildung 4-4A ersichtlich: Sowohl Kühlung als auch Erwärmung der Fingertemperatur führte zu einer signifikanten Erhöhung der Weber-Brüche (Bonferroni-post-hoc Tests $p < 0.01$). Die Weber-Brüche bei Handtemperaturen von 20°C und 37°C unterschieden sich nicht statistisch signifikant voneinander ($p = 0.20$).

¹⁰ Ein Effektstärkemaß der Varianzanalyse ist das partielle η^2 . Es gibt die durch den Faktor aufgeklärte Varianz an der Gesamtvarianz an und kann Werte zwischen [0;1] annehmen.

Ein differentieller Einfluss von Temperatur und Textur auf die Unterschiedsschwelle konnte zwar nachgewiesen werden, allerdings ist der Effekt eher als gering zu bewerten (Effektstärke $\eta^2=0.235$). Einzelne Post-hoc F-Tests zeigten einen signifikanten Einfluss der Temperatur für Standardtexturen mit räumlicher Periode von 0.03 mm ($F(2,23)=6.939$, $p<0.01$; $\eta^2=0.376$) und 0.27 mm ($F(2,23)=20.616$, $p<0.01$; $\eta^2=0.642$). Texturen mit räumlicher Periode von 0.05 mm ($F(2,23)=4.079$, $p=0.030$; $\eta^2=0.262$) und 0.11 mm ($F(2,23)=3.916$, $p=0.034$; $\eta^2=0.254$) erreichten für ein Signifikanzniveau von 5% statistische Signifikanz. Keine Temperaturabhängigkeit zeigte sich für Reize mit räumlicher Periode von 1.43 mm ($F(2,23)=1.278$, $p=0.298$).

Tabelle 4-4 F-Statistiken der 3x5 ANOVA für die Gruppe LM.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Textur (5)	30.97 (1.8, 41.1)	< 0.05	0.574
HE Temperatur (3)	15.56 (2,23)	< 0.05	0.575
WW Textur x Temperatur	3.53 (3.6, 41.2)	< 0.05	0.235

Am stärksten ist demzufolge der differentielle Temperatureinfluss für Texturen mit räumlichen Perioden von 0.27 mm (im Vergleich zu 0.03 mm). Kein Einfluss kann auf Makrotexturen (Texturen mit räumlichen Perioden von 1.43 mm) nachgewiesen werden.

4-1-3-4 Explorieren durch Ausüben von Druck

Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche. Das Auflösungsvermögen für Oberflächentextur, wenn diese durch Ausüben von Druck exploriert wird, ist getrennt für die adaptierten Fingertemperaturen in Tabelle 4-5 zusammengestellt. Bei normaler Handtemperatur werden im Mikrotextrbereich Unterschiede von 44-50% zwischen den Texturen nötig. Am besten können Texturen mit einer räumlichen Periode von 1.43 mm diskriminiert werden. In Abbildung 4-4B wird deutlich, dass auch im Mikrotextrbereich der Einfluss der Fingertemperatur unabhängig von seiner Qualität zunimmt. Erneut scheint Manipulation der Fingertemperatur bei räumlichen Perioden von 1.43 mm keine Rolle zu spielen.

Tabelle 4-5 Ausüben von Druck (Gruppe P) – Einfluss der adaptierten Temperatur (20°C, 34°C, 37°C) auf die Weber-Brüche in Abhängigkeit der räumlichen Periode (RP) der Standardtextur.

räumliche Periode:	Fingertemperatur					
	20°C		34°C		37°C	
	MW	sd	MW	sd	MW	sd
0.09 mm	1.33	0.40	0.50	0.12	1.33	0.66
0.14 mm	1.02	0.42	0.44	0.11	1.10	0.49
0.27 mm	0.56	0.11	0.33	0.04	0.57	0.07
1.43 mm	0.21	0.05	0.15	0.04	0.22	0.07

Testen der Hypothesen. Tabelle 4-6 können die F-Statistiken der ANOVA mit Messwiederholung auf dem Faktor Standardtextur (4 Stufen) sowie adaptierte Fingertemperatur (3 Stufen) entnommen werden. Auch bei Explorieren von Texturen durch Ausüben von Druck werden alle Effekte signifikant; am meisten Varianz erklärt jedoch Standardtextur. Wie in Abbildung 4-4B erkennbar ist, nehmen die Weber-Brüche mit zunehmender räumlicher Periode der Standardtextur zu. Diese Zunahme kann am besten mit einem linearen Trend ($F(1,24)=89.27$, $p<0.001$; $\eta^2=0.788$) erklärt werden. Alle Mittelwerte unterscheiden sich bei

Bonferroni-post-hoc Tests signifikant voneinander ($p < 0.01$) mit Ausnahme der Texturen 0.09 mm und 0.14 mm ($p = 0.07$).

Tabelle 4-6 F-Statistiken der 3x4 ANOVA für die Gruppe P

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Textur (4)	56.60 (1.8, 43.4)	< 0.05	0.702
HE Temperatur (3)	0.44 (2,24)	< 0.05	0.465
WW Textur x Temperatur	3.53 (3.6, 43.4)	< 0.05	0.287

Auch die Manipulation der Temperatur beeinflusste signifikant die Weber-Brüche. Dabei führt erneut sowohl Erwärmung als auch Kühlung der Fingertemperatur zu einer signifikanten Reduktion der Diskriminierungsleistung (Bonferroni-post-hoc Tests: $p < 0.01$). Kein Unterschied zwischen Adaptation auf 37°C oder 20°C konnte nachgewiesen werden ($p = 1.00$).

Der differentielle Einfluss manipulierter Fingertemperatur in Abhängigkeit der Standardtextur auf die Weber-Brüche konnte bestätigt werden: Allerdings ist auch bei Gruppe P der Effekt relativ schwach. Post-hoc F-Tests zeigten, dass der Temperatureinfluss statistisch bedeutsam für Texturen mit räumlicher Periode von 0.09 mm ($F(2,24) = 7.964$, $p < 0.01$; $\eta^2 = 0.399$), 0.14 mm ($F(2,24) = 6.491$, $p < 0.01$; $\eta^2 = 0.351$) und 0.27 mm ($F(2,24) = 20.581$, $p < 0.01$; $\eta^2 = 0.632$) ist, allerdings nicht für Reize mit räumlicher Periode von 1.43 mm ($F(2,24) = 2.770$, $p = 0.083$). Der effektstärkste Einfluss der Temperatur zeigt sich wiederum bei Standardtexturen von 0.85 mm.

4-1-3-5 Einfluss der Explorationsmethode und Fingertemperatur auf die Weber-Brüche

Die Weber-Brüche für Mikro- und Makrotextur (räumliche Perioden von 0.27 mm und 1.43 mm) ist in Abbildung 4-5 graphisch dargestellt: Die Diskriminierung von Makrotexturen zeigt sich der von Mikrotexturen als deutlich überlegen.

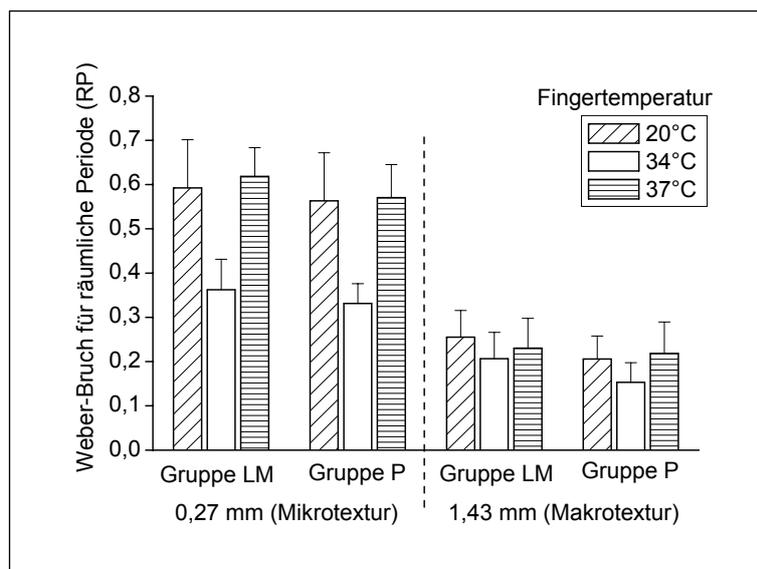


Abb. 4-5 Weber-Brüche für die Exploration durch seitliche Bewegung (LM) sowie Ausüben von Druck (P), wenn die Fingertemperatur 20°C, 34°C oder 37°C betrug, getrennt nach Makro- und Mikrotextur.

Zusätzlich lässt sich ein markanter Temperatureinfluss unabhängig von der Explorationsart nachweisen: Bei Kühlung oder Erwärmung nehmen die Weber-Brüche zu und damit die Diskriminierungsfähigkeit gegenüber der Körpertemperatur ab.

Tabelle 4-7 sind die F-Statistiken der ANOVA zusammengestellt. Alle Effekte werden statistisch signifikant; am meisten Varianz erklärt jedoch der Texturtyp (Makro-, Mikrotextrur): Der Weber-Bruch ist geringer bei Texturen mit einer räumlichen Periode von 1.43 mm. Zweitstärkster Effekt ist Einfluss der Fingertemperatur: Wie oben bereits in beiden Gruppen einzeln gezeigt, geht der Haupteffekt auf eine Erhöhung der Weber-Brüche bei Kühlung oder Erwärmung der Fingertemperatur zurück (Bonferroni-post-hoc Tests zeigen signifikante Unterschiede beider Temperaturmanipulationen im Vergleich zur Normaltemperatur mit p-Werten < 0.01). Die Weber-Brüche bei Adaptation auf 37°C unterscheiden sich nicht von denen bei Adaptation auf 20°C (p=1.00). Auch die Interaktion zwischen beiden Variablen (Temperatur und Texturtyp) wird statistisch signifikant und geht auf einen stärkeren Temperatureinfluss bei der Gruppe LM zurück (s. Abbildung 4-5).

Die Explorationsmethode beeinflusst die Weber-Brüche: Die Diskriminierungsleistung ist höher, wenn durch Ausüben von Druck exploriert wird (vgl. hierzu Tabellen 4-3 und 4-4). Der Effekt ist jedoch vernachlässigbar ($\eta^2=0.108$).

Tabelle 4-7 F-Statistiken der ANOVA für Explorationsmethode, Texturtyp und Fingertemperatur.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Texturtyp (2)	491.59 (1,47)	< 0.05	0.913
HE Temperatur (3)	33.89 (2,47)	< 0.05	0.591
WW Texturtyp x Temperatur	20.903 (2, 47)	< 0.05	0.471
HE Explorationsmethode EM (2)	5.70 (1,47)	< 0.05	0.108
WW Texturtyp x Temperatur x EM	0.55 (2,47)	0.583	0.023
WW Temperatur x EM	0.056 (2,47)	0.946	0.002
WW Texturtyp x EM	0.01 (1,47)	0.938	0.000

4-1-4 Diskussion

Werden Standardtexturen durch laterale Bewegung exploriert, lassen sich Weber-Brüche identifizieren, die in gutem Einklang zu Befunden aus der Literatur stehen (z.B. Hollins et al., 2001): Das Auflösungsvermögen von Makrotexuren ist höher als bei Mikrotexuren. Desgleichen stimmen die Ergebnisse mit aus der Literatur bekannten Weber-Brüchen für Frequenzdiskriminierung und Amplitudendiskriminierung überein: 20% Unterschied zur Standardamplitude im niederfrequenten Bereich und 30-40% Unterschied im hochfrequenten Bereich sind nötig, um eine Veränderung wahrnehmen zu können. Im Allgemeinen scheinen Menschen Texturen ähnlich wie Vibrationen über Amplitude und Frequenz zu kodieren (vgl. Pongrac, 2006), d.h. der der Texturwahrnehmung zugrunde liegende Code ist nicht nur intensiv, sondern auch temporal (z.B. Bensmaïa & Hollins, 2003; Gamzu & Ahissar, 2001; Van Doren, 1989; vgl. auch Abschnitt 2-4).

In Tabelle 4-8 sind die Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst.

Einfluss der Standardtextur. Wie in Hypothese 1-1 erwartet, zeigen sich beim Explorieren der Texturen durch seitliche Bewegung reduzierte Weber-Brüche für Texturen mit räumlichen Perioden von 0.11 mm und 1.43 mm. Ein Zusammenhang zu den frequenzsensitiven Mechanorezeptoren war angenommen worden (s. dazu auch Abschnitt 2-4). Die theoretisch

bei Streichen über eine Oberfläche zwischen Fingerspitze und Textur erzeugten vibrotaktilen Frequenzen liegen bei einer Bewegungsgeschwindigkeit von 80 mm/s erzeugten Frequenzen liegen bei ca. 740 Hz bei Texturen mit einer räumlichen Periode von 0.11 mm, 296 Hz bei 0.27 mm und 56 Hz bei 1.43 mm. Die hohe Sensitivität bei Texturen mit 1.27 mm räumlicher Periode bei Explorieren durch laterale Bewegung lässt sich auf das Empfindlichkeitsoptimum (ca. 50 Hz) der beteiligten Meissner-Körperchen zurückführen (s. ausführlich Abschnitt 2-1-1-1). Das Optimum für die an der Dekodierung hochfrequenter Vibrationen beteiligten Pacini-Körperchen wird zwischen 200-250 Hz angenommen. Die Sensitivität für Frequenzen ist jedoch auch oberhalb von 500 Hz noch sehr gut (z.B. Pongrac, 2006). Die Ergebnisse über die Diskriminierungsfähigkeit von Texturen unterschiedlicher räumlicher Periode, wenn diese durch seitliche Bewegung untersucht werden sollen, stehen demzufolge in Einklang mit den Ergebnissen der Textur- sowie der Vibrationsforschung.

Werden Texturen durch Ausüben von Druck untersucht, zeigt sich eine lineare Abnahme des Weber-Bruchs mit abnehmender räumlicher Periode: Je kleiner die Texturpartikel also werden, desto stärker reduziert sich, bei fehlender Bewegung, die Diskriminierungsfähigkeit. Am höchsten ist die Unterscheidungsfähigkeit bei Texturen mit räumlichen Perioden von 1.43 mm. Dies wiederum entspricht dem Auflösungsvermögen statisch präsentierter Reize (z.B. Johnson & Lamb, 1981; Johnson & Phillips, 1981), die wie ausführlich in Kapitel 2-1-1-1 dargestellt, vornehmlich von Merkel-Zellen dekodiert werden.

Einfluss der Fingertemperatur. Wie in Hypothese 1-4 erwartet und getrennt für beide Explorationsmethoden gezeigt, beeinflusst eine generelle Variation der Fingertemperatur die Weber-Brüche: Sowohl Kühlung als auch Erwärmung der Haut führt zu einer Verringerung der Diskriminierungsleistung.

Differentielle Effekte der Temperatur in Abhängigkeit der Textur waren erwartet worden (vgl. Hypothese 1-5 und 1-6) und zeigten (wenn auch eine eher effektschwache) statistische Bedeutsamkeit: Besonders stark reduzierte sich das Auflösungsvermögen bei Texturen von 0.27 mm und einer Variation der Fingertemperatur um 37°C oder 20°C; dies traf sowohl bei Explorieren durch seitliche Bewegung als auch bei Ausüben von Druck zu, während Texturen mit räumlicher Periode von 1.43 mm von einer Temperaturmanipulation unabhängig blieben. Wurden nur die beiden Texturen (0.27, 1.43 mm räumliche Periode) betrachtet, so ließ sich eine höhere Unterscheidungsfähigkeit für Makrotexturen nachweisen sowie eine Beeinträchtigung derselben bei abweichender Hauttemperatur von der Normaltemperatur, besonders bei Mikrotexturen.

Wie bereits in Abschnitt 2-1-1-3 angesprochen wurde, moduliert die Temperatur den Erregungsprozess einiger Mechanosensoren, nämlich der Pacini Körperchen und der Merkel-Zellen, aber auch der Ruffini-Körperchen. Das Auflösungsvermögen für Texturen scheint besonders im Mikrotexturbereich, in dem die Pacini-Körperchen frequenzsensitiv sind, temperaturabhängig. Dies steht in Übereinstimmung mit der Literatur.

Die Merkel-Zellen, die bei der Wahrnehmung von Makrotextur (1.43 mm) dominieren dürften, scheinen eher unbeeinflusst durch Temperatureinflüsse zu sein. Eine Reduzierung der Leistung besonders bei Kühlung war teilweise nachgewiesen worden (s. Konietzny & Hensel, 1979; Konietzny, 1984); einige Zellen reagierten überhaupt nicht auf Temperaturvariationen. Dies bedeutet, dass besonders beim Dekodieren der räumlichen Periode von 1.43 mm Merkel-Zellen beteiligt waren; mit Annäherung an die Grenzen des Auflösungsvermögens scheint die Beeinträchtigung durch zusätzliche Variation der Fingertemperatur nicht mehr kompensierbar zu sein.

Zusammenfassung. Der Einfluss der Explorationsmethode bei Texturen mit räumlicher Periode von 0.27 mm und 1.43 mm kann vernachlässigt werden: Unabhängig davon, ob „adäquat“ im Sinne von Lederman & Klatzky (1987) exploriert wurde, konnte die Diskriminierungsleistung auf Variationen der Fingertemperatur und der Standardtextur zurückgeführt

werden. Während größere Unterschiede zwischen den Mikrotexturen (0.27 mm) nötig waren, um wahrgenommen werden zu können (ca. 30%), konnten bereits Unterschiede von ca. 20% im Makrotexturbereich (1.43 mm) unterschieden werden.

Werden darüber hinaus jedoch Mikrotexturen mit geringeren räumlichen Texturen betrachtet, so zeigt sich eine deutliche Überlegenheit der seitlichen Bewegung gegenüber dem Ausüben von Druck sowie ein allgemein hohes Auflösungsvermögen für Texturen bei durch Streichen über die Oberfläche theoretisch erzeugten vibrotaktilen Frequenzen.

Tabelle 4-8 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock I „Auflösungsvermögen von Oberflächentextur – Einfluss von Explorationsmethode und Fingertemperatur“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
I-1 Bei Exploration durch laterale Bewegung sind die Weber-Brüche abhängig von der Standardtextur	bestätigt	$\eta^2=0.57$
I-2 Bei Exploration durch Ausüben von Druck sind die Weber-Brüche im Makrotexturbereich hoch und nimmt mit zunehmender räumlicher Periode ab	bestätigt	$\eta^2=0.70$
Die Weber-Brüche unterscheiden sich in Abhängigkeit des Texturtyps (Makro- vs. Mikrotextur)	bestätigt	$\eta^2=0.91$
I-3 Die Weber-Brüche sind abhängig von der Explorationsmethode und der Standardtextur	n. bestätigt	
I-4 Kühlung wie Erwärmung der Finger führt zu einer generellen Abnahme der Diskriminierungsfähigkeit von Texturen	bestätigt	$\eta^2=0.59$
I-5 Bei Exploration durch laterale Bewegung ist die Abnahme der Diskriminierungsfähigkeit von Texturen durch Variation der Fingertemperatur am stärksten bei Mikrotexturen	bestätigt	$\eta^2=0.24$
I-6 Bei Exploration durch Ausüben von Druck ist der Einfluss von v.a. Kühlung der Finger am stärksten im Bereich außerhalb des Auflösungsvermögens der Merkel-Zellen (Mikrotexturen)	bestätigt	$\eta^2=0.29$ (für Kühlung sowie Wärmung)
Die Weber-Brüche sind abhängig von der Fingertemperatur und dem Texturtyp	bestätigt	$\eta^2=0.47$

Dies bedeutet zusammengenommen, dass insbesondere Mikrotexturen durch Streichen über die Oberfläche untersucht werden sollten, während Makrotexturen sowohl über Ausüben von Druck als auch durch laterale Bewegung leicht diskriminiert werden können. Bei der Darbietung von Texturen unterschiedlicher räumlicher Periode ist besonders auf eine gute Auflösung im niederfrequenten Bereich zu achten und im hochfrequenten Bereich bei ca. 250-300 Hz sowie ca. 500-700 Hz.

Abweichungen der Hauttemperatur von der Normaltemperatur durch Kühlung oder Erwärmung resultierte insbesondere bei Mikrotexturen in einer drastischen Reduktion der Unterscheidungsfähigkeit. Dieser Einfluss konnte, unabhängig von der Explorationsmethode, bei Makrotexturen nicht nachgewiesen werden. Eine Kontrolle der Hauttemperatur wird demzufolge beim Explorieren von Mikrotexturen, nicht jedoch von Makrotexturen erforderlich, wenn ein hohes Auflösungsvermögen relevant ist.

4-2 Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit

“The results were interpreted as evidence that there is a loss in perceptual resolution when the discrimination task requires force and displacement or velocity cues to be combined“

(Tan, Durlach, Beauregard & Srinivasan, 1995, p. 496)

4-2-1 Theoretischer Hintergrund

Neben Textur (*Rau-Glatt*) kennzeichnet die Dimension *Hart-Weich* eine ebenso wichtige und beim Wahrnehmen und Erkennen von Objekten relevante Eigenschaft (z.B. Hollins et al., 1993). Diese wird im Folgenden mit *Nachgiebigkeit* bezeichnet. Informationen über die Nachgiebigkeit eines Objektes können über Greifen oder Ausüben von Druck gewonnen werden. Klatzky und Lederman unterscheiden bei der Wahrnehmung von Objekten durch das haptische System zwischen Manipulieren (d.h. beispielsweise Greifen) und Explorieren (vgl. Klatzky, Lederman, Pellegrino, Doherty & McCloskey, 1990): Ausüben von Druck wird als eine der Explorationsmethoden bezeichnet, mittels der Informationen über die Härte eines Objektes gewonnen werden kann (s. Abschnitt 2-3).

Beim Manipulieren eines Objektes wird seine Oberfläche deformiert. Zwei Arten der Deformation eines Objektes können physikalisch unterschieden werden: Elastische Deformation bedeutet, dass bis zu einem bestimmten Punkt ein Objekt deformiert werden und anschließend in seinen Zustand zurückkehren kann. Plastische Deformation geht über diesen Punkt hinaus: Nach Wegnahme der Kraft bleibt das Objekt dauerhaft deformiert (z.B. Grassmann, 1988). Im Folgenden ist lediglich die elastische Deformation relevant; auf eine weitere Unterscheidung wird verzichtet: Unter Deformation ist stets die elastische Deformation zu verstehen.

Als Steifigkeit (resp. Nachgiebigkeit¹¹) wird die physikalische Eigenschaft definiert, die das Objekt seiner Deformation entgegen aufbringen kann (z.B. Grassmann, 1988). Diese Objekteigenschaft kann auf unterschiedliche Weise umgesetzt werden, in dem zum einen lediglich die Veränderung des Wegs in Abhängigkeit der Kraft oder zusätzlich die Veränderung der Oberfläche bei Aufbringen von Druck dargestellt wird. In der Forschung unterscheidet man Stimulusklassen für beide Varianten: Objekte mit nicht-deformierbarer (wie z.B. eine Druckfeder) und solche mit deformierbarer Oberfläche (wie z.B. Gummwürfel).

Bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit wird Kraft auf ein Objekt angewendet. Dabei verarbeitet das propriozeptive System Signale über die aufgewandte Kraft, die Muskelanspannung sowie die bewirkte Veränderung, z.B. Stauchung. Auch Informationen über die Deformation der Oberfläche tragen zur Wahrnehmung der Objektnachgiebigkeit bei; diese wiederum werden durch die Merkel-Zellen detektiert (vgl. Abschnitt 2-1-1-1): So wurde bereits in Abschnitt 2-6-2 darauf hingewiesen, dass ein Fehlen taktiler Informationen zu einer Reduktion der Sensitivität führen kann (vgl. Srinivasan & La Motte, 1995).

Wie Tan und Kollegen zeigten, werden bei der haptischen Wahrnehmung von Nachgiebigkeit Informationen über die Kraft mit der Positionsinformation, also der Eindringtiefe in einen

¹¹ Nachgiebigkeit resp. Steifigkeit wird in Abhängigkeit unterschiedlich denotiert: Während Nachgiebigkeit (definiert als [mm/N]) v.a. dann benannt wird, wenn die Objekte leicht deformierbar sind („Weichheit“), wird eher von Steifigkeit (definiert als [N/mm]) gesprochen, wenn die Objekte gering deformierbar sind („Härte“). Im ersten Fall interessiert demzufolge v.a. die Wahrnehmung von weichen, im zweiten Fall von harten Objekten.

nachgiebigen Körper bzw. der Greifspanne, kombiniert, was zu erhöhten Weber-Brüchen führt (z.B. Tan, Durlach, Beauregard & Srinivasan, 1995; Tan, Durlach, Shao & Wei, 1993; Tan, Pang & Durlach, 1992). Wurde die Greifspanne jedoch konstant gehalten, reduzierte sich der Weber-Bruch auf 8% (z.B. Tan et al., 1995), d.h. die Probanden diskriminierten nicht mehr Nachgiebigkeit, sondern Kraft (vgl. Pang, Tan & Durlach, 1991).

Im Allgemeinen sind Menschen in der Lage, ca. 8-10% Unterschiede zwischen Kräften beim Heben von Gewichten (z.B. Jones, 1989; Ardila, Uribe & Angel, 1987; Raj et al., 1985; Ross & Reschke, 1982; Engen, 1971; Holway & Hurvich, 1937; Holway, Smith & Zigler, 1937) oder 7-13% beim Greifen (z.B. Yamakawa, Fujimoto, Manabe & Kobayashi, 2005; Pang et al., 1991; Williams, Schmidt Hanson, Crary & Wharton, 1991) zu unterscheiden. Auch Katz & Stephenson (1937) zeigten bereits, dass die Wahrnehmung von Nachgiebigkeit und Kraft unterschiedlich ist.

Desgleichen lässt sich in der psychophysischen Literatur eine sehr hohe Auflösungsgenauigkeit für die haptische Wahrnehmung von Länge, Größe oder Breite eines Objekts beim Greifen zwischen Daumen und Zeigefinger bestätigten (z.B. Durlach et al., 1989; Wang, 1979; Evans & Howarth, 1966; Dietze, 1961; Stevens & Stone, 1959; Gaydos, 1958; Langfeld, 1917; Jastrow, 1886). Der JND-% liegt bei ca. 5-10% der Standardlänge (z.B. Durlach et al., 1989; Evans & Howarth, 1966; Dietze, 1961; Stevens & Stone, 1959; Gaydos, 1958; Kelvin, 1954; Jastrow, 1886; oder Fingerspanne: Langfeld, 1917). Gephstein & Banks (2003) berichten Weber-Brüche von 0.10 für Fingerabstand unabhängig von der Orientierung des zu diskriminierenden Objekts.

Eine Variation von Kraft und Distanz sollte demzufolge, wie schon von Tan und Kollegen gezeigt besonders beim Greifen von Objekten zu höheren Weber-Brüchen führen (z.B. Tan et al., 1995). Da in der psychophysischen Forschung zur Wahrnehmung von Nachgiebigkeit beide oben genannten Explorationsmethoden vorherrschend sind, wird auf die Ergebnisse getrennt eingegangen.

Exploration von Nachgiebigkeit durch Greifen (s. Tabelle 4-9). In der Forschung zur Wahrnehmung von Nachgiebigkeit (resp. Steifigkeit) von Objekten wird meist als Explorationsmethode Greifen bevorzugt. Werden dabei, z.B. Silikonzylinder (z.B. Scott-Blair & Coppen, 1940, 1939; Coppen, 1942) oder -würfel (z.B. Mioche, Auroy, Lepetit & Compagnon, 1991) mittels Greifkraft untersucht, liegt die minimal nötige Abweichung zur Detektion eines Unterschieds bei ca. 10%. Harper (1952) berichtet darüber hinaus eine höhere Sensitivität bei der Diskriminierung von weicheren Objekten.

Tabelle 4-9 Weber-Brüche sowie zugehörige Standardstimuli bei Diskriminierung von Steifigkeit (N/mm) resp. Nachgiebigkeit (mm/N) beim Greifen eines Objektes

	Weber-Brüche	Wertebereich
	Reizproben aus Silikon (nichtlineare Nachgiebigkeit)	
Scott-Blair & Coppen (1939, 1940)	0.09	1.5 N/mm ²
Mioche et al. (1991)	0.11	18.1-60 N/mm ²
Coppen (1942)	0.29	n. a.
Harper (1952)	0.06	n. a.
	Mechanische Apparate (lineare Nachgiebigkeit)	
Roland & Ladegaard-Pedersen (1977)	0.22	0.06-10 mm/N (max. Zusammendrücken)
	0.09	0.05-2.8 mm/N (freie Exploration)
Tan et al. (1992, 1993, 1995)	0.22	4 mm/N
Yamakawa et al. (2005)	0.21	1.25-3.33 mm/N (bzw. 0.8 to 0.3 N/mm)

Für einen breiten Wertebereich an (linearen) Nachgiebigkeiten von Federelementen ermittelte Roland & Ladegaard-Pedersen (1977) Weber-Brüche von ca. 0.22 bei maximalem Zu-

sammendrücken der Finger und 0.09, wenn das Ausmaß des Zusammendrückens frei wählbar war. Wird (lineare) Nachgiebigkeit durch Apparate realisiert, die eine Variation von Weg und Kraft erlauben, lässt sich desgleichen ein minimal spürbarer Unterschied von ca. 22% in der Nachgiebigkeit finden (z.B. Yamakawa et al., 2005; Tan et al., 1995).

Exploration von Nachgiebigkeit durch Ausüben von Druck (s. Tabelle 4-10). In der psychophysischen Literatur zur Wahrnehmung von Nachgiebigkeit finden sich nur wenige Studien, die die menschliche Diskriminierungsfähigkeit bei Ausüben von Druck über die Fingerspitze untersuchen: Srinivasan & La Motte (1995; La Motte, 2000) zeigten, dass weiche Objekte (Silikonproben oder Formfederzellen mit einem Stimulusrange von 0.19-0.78 mm/N) mit 90%-iger Wahrscheinlichkeit voneinander diskriminiert werden konnten.

Ähnlich hohe Leistung fand La Motte (2000) für nachgiebige Silikonwürfel (Stimulusrange von 0.19-0.78 mm/N), wenn diese nicht mit der Fingerspitze sondern mit einem Taststift untersucht wurden: Die Diskriminierungsleistung war besser, wenn aktiv exploriert wurde und hing bei passiver Exploration (der Versuchsleiter bewegte die Reizprobe gegen den Taststift des Probanden) von der Darbietungsgeschwindigkeit ab (La Motte, 2000). Dies liefert Hinweise darauf, dass v.a. propriozeptive Informationen, weniger taktile, beim Wahrnehmen von Nachgiebigkeit relevant sind, bzw. ausreichen können (vgl. auch Roland & Ladegaard-Pedersen, 1977; vgl. Abschnitt 2-6).

Auch Untersuchungen zu virtuell generierter Nachgiebigkeit zeigten ähnliche, teilweise jedoch auch höhere Weber-Brüche. Wird Nachgiebigkeit über ein haptisches Ein-/Ausgabegerät untersucht, beispielsweise ein PHANTOM® (SensAble Technologies, Inc., USA), sind ca. 37% Unterschied in der Nachgiebigkeit virtuell generierter Oberflächen nötig (Wall & Brewster, 2003). Einen ähnlich hohen Weber-Bruch ermittelten O'Malley & Goldfarb (2002). Werden vergleichsweise Oberflächen mit höherer Nachgiebigkeit implementiert, waren 15-20% Unterschiede zur erfolgreichen Diskriminierung zwischen Nachgiebigkeiten nötig (vgl. Dhruv & Tendick, 2000; Hogan, Kay, Fasse & Mussa-Ivaldi, 1990). Darüber hinaus fanden Jones & Hunter (1990) in Matching-Experimenten, dass ab ca. 0.64 N/mm die Weber-Brüche relativ konstant bei 0.23 lagen.

Tabelle 4-10 Weber-Brüche sowie zugehörige Standardstimuli bei Diskriminierung von Steifigkeit (N/mm) resp. Nachgiebigkeit (mm/N) beim Ausüben von Druck.

	Weber-Brüche	Wertebereich
Beidhändiges Drücken mit Körperunterstützung		
Maher & Adams (1995)	0.11	0.12 (bzw. 8.39 N/mm)
Nicholson, Adams & Maher (1997; 2003)	0.08	0.08 mm/N (bzw. of 12.48 N/mm) 1.32 mm/N (bzw. of 0.76 N/mm)
Nicholson, Maher & Adams (1998)	0.09	0.09 mm/N (bzw. of 11.40 N/mm)
Ausüben von Druck mit einer Hand		
Hogan et al. (1990)	0.15	1.25-2.5 mm/N (bzw. 0.4-0.8 N/mm)
Jones & Hunter (1990)	0.23	0.16-1.49 mm/N (bzw. 0.67 to 6.26 N/mm)
Dhruv & Tendick (2000)	0.19	2, 4, 8 mm/N
Wagner et al. (2005)	0.20	1.75 kPa
Wall & Brewster (2003)	0.37	0.20 mm/N (bzw. 5 N/mm)
O'Malley & Goldfarb (2002)	0.30	0.10 mm/N (bzw. of 10 N/mm)

Die Forschergruppe um Maher, Adams und Nicholson (z.B. Nicholson et al., 2005, 1997; Nicholson et al., 1998; Maher & Adams, 1995;) ließen ihre Probanden Steifigkeiten über einen Apparat diskriminieren, auf den diese mit der Handkante (zwischen dem Erbsen- und Hakenbein), unterstützt durch den gesamten Körper über den Arm, Druck ausübten; dieser

Griff wird in der Medizin *pisiform grip* genannt (z.B. Maher & Adams, 1996). Die derart ermittelten Unterschiedsschwellen liegen bei etwa 12.5% (vgl. Maher, 1995) der Standardnachgiebigkeit und legen nahe, dass die Probanden weniger die Nachgiebigkeit als vielmehr die über den Körper auf die Hand aufgebrachte Kraft diskriminierten. Um zu testen, ob nicht-lineare Nachgiebigkeit die Diskriminierungsleistung beeinflusst, umhüllten Nicholson et al. (1998) die Kontaktregion; es zeigte sich kein Einfluss.

Zusammenfassend scheint beim Explorieren nachgiebiger Objekte durch Ausüben von Druck ein Einfluss der Standardnachgiebigkeit möglich (z.B. Wall & Brewster, 2003; O'Malley & Goldfarb, 2002; Jones & Hunter, 1990).

Offene Fragestellungen. Wie Befunde aus der Literatur besonders bei Exploration durch Ausüben von Druck andeuten, scheint die Diskriminierungsfähigkeit für nachgiebige Objekte vom gewählten Standardreiz abzuhängen (z.B. Wall & Brewster, 2003; O'Malley & Goldfarb, 2002; Dhruv & Tendick, 2000; Hogan et al., 1990; Jones & Hunter, 1990). Es soll daher der Einfluss der Standardnachgiebigkeit auf die Diskriminierbarkeit untersucht werden (vgl. Harper, 1952).

Hypothese II-1: Nachgiebige und gering nachgiebige Objekte werden mit unterschiedlicher Sensitivität voneinander unterschieden.

Klatzky, Lederman und Kollegen (z.B. Klatzky et al., 1990; Lederman & Klatzky, 1987) unterscheiden zwischen haptischen Explorations- und Manipulationsmethoden (s. Abschnitt 2-3). Die Wahrnehmung eines Objektes durch das haptische System erfolgt zweistufig: Zuerst wird das Objekt z.B. gegriffen (grobe Extraktion der Objektmerkmale), danach wird durch spezifische Explorationsmethoden (z.B. Ausüben von Druck) mehr Informationen über das Zielmerkmal gewonnen. In Anlehnung an die Bedeutung sowie den typischen Einsatz beider Methoden wird eine unterschiedliche Sensitivität erwartet.

Hypothese II-2: Ausüben von Druck mittels eines Fingers führt zu höherer Sensitivität als Greifen des Objektes zwischen zwei Fingern.

Da diese erhöhte Sensitivität jedoch abhängig vom dargebotenen Wertebereich zu sein scheint (vgl. Raj et al., 1985), sollte der Beitrag der verwendeten Explorationsmethode abhängig davon sein, ob das Objekt eher weich oder hart ist. Durch Greifen können höhere Kräfte gegeneinander aufgewendet werden, weshalb die Fähigkeit gerade härtere Objekte zu unterscheiden, besser sein sollte.

Hypothese II-3: Harte Objekte werden besser durch Greifen als durch Ausüben von Druck mittels eines Fingers diskriminiert, weiche besser durch Ausüben von Druck.

Zusätzlich zeigt sich oft beim Manipulieren nachgiebiger Objekte ein von der Standardnachgiebigkeit abhängiges Muster beim Greifen oder Drücken aufgewendeter Kräfte (z.B. Choi, Walker, Tan, Crittenden & Reifenberger, 2005; Chib, Patton, Lynch & Mussa-Ivaldi, 2004; Fujita & Oyama, 1999): Bei harten Objekten tendieren die Probanden dazu, eine konstante Kraft auszuüben. Wurden Objekte mit geringer Steifigkeit (hoher Nachgiebigkeit) untersucht, fand sich ein anderes Muster: Probanden versuchen, eine konstante Position, Verformtiefe oder Fingerabstand beim Greifen, aufrechtzuerhalten (z.B. Chib et al., 2004). In Anlehnung an Chib et al. (2004) sowie Jones & Hunter (1989) wird daher in Abhängigkeit für geringe und hohe Nachgiebigkeit ab einem Grenzwert von 0.16 mm/N erwartet, dass sich ein unterschiedliches Kraftmuster beim Ausüben von Druck nachweisen lässt.

Hypothese II-4: Bei Ausüben von Druck verändert sich die aufgewendete Kraft in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit: Beim Explorieren von

Nachgiebigkeiten größer 0.16 mm/N werden geringere Kräfte aufgewandt. In Abhängigkeit der Objektnachgiebigkeit ist der Trend für aufgewendete Kraft unterschiedlich: Bei harten Objekten sind die aufgewendeten Kräfte nahezu gleich, während sie bei weichen Objekten linear abnehmen.

Handtemperatur und damit die Temperatur der Finger bzw. der Fingerspitze, spielt bei der Wahrnehmung z.B. der Textur von Objekten eine große Rolle (vgl. Abschnitt 4-1). Auch bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit wurden Zusammenhänge mit der Temperatur berichtet (z.B. Sullivan 1927). Besonders Kühlung der Hauttemperatur scheint die Diskriminierungsleistung beim Testen von Silikonproben (z.B. Harper, 1952) sowie Federelementen (z.B. Scott-Blair, 1954) zu reduzieren. Möglicherweise ist der Effekt bei realen Objekten geringer (vgl. Scott-Blair & Coppen, 1940, 1939). Bis zu diesem Zeitpunkt wurde jedoch nach Wissen des Autors keine systematische Untersuchung des Einflusses von Fingertemperatur auf das haptische Auflösungsvermögen von Nachgiebigkeit unternommen.

Merkel-Zellen reagieren auf Druck und auf Veränderung in der Hauttemperatur (vgl. Abschnitt 2-1-1); der Einfluss taktiler Informationen auf die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit deformierbarer Objekte wurde bereits erwähnt (s. oben; vgl. z.B. Srinivasan & La Motte, 1995; Roland & Ladegaard-Pedersen, 1977). Es wird daher erwartet, dass eine Änderung der Fingertemperatur (unabhängig von der Explorationsmethode) die Sensitivität für die Wahrnehmung von Unterschieden reduziert.

Hypothese II-5: Manipulation der Fingertemperatur (Erwärmung, Kühlung) führt zu einer generellen Reduktion der Sensitivität.

Der Beitrag der Mechanorezeptoren an der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit spielt besonders bei deformierbaren Objekten eine Rolle, da zusätzliche Informationen über die Deformierungsverteilung gewonnen werden können. Es können jedoch auch Objekte mit ähnlich hoher Sensitivität voneinander unterschieden werden, deren Oberfläche nicht deformierbar ist (s. oben). Eine deutliche Verschlechterung zeigte sich erst, wenn passiv exploriert werden sollte (s. Abschnitt 2-6): Nachgiebigkeit von Federelementen konnte über alleinige taktile Informationen nicht unterschieden werden.

Obleich erwartet wird, dass eine Manipulation der Fingertemperatur zu einer Reduktion der taktilen Informationen und damit einer Verschlechterung der Sensitivität einher gehen sollte, könnten die Probanden eine Reduktion des Auflösungsvermögens auch durch eine Erhöhung ihrer Kräfte kompensieren. Das wiederum sollte in einer Erhöhung der aufgebrauchten Kräfte mit Abweichung der Hauttemperatur von der Normaltemperatur resultieren.

Hypothese II-6: Bei normaler Fingertemperatur werden beim Explorieren durch Ausüben von Druck durchschnittlich geringere Kräfte ausgeübt als bei durch Kälte oder Wärme veränderte Fingertemperatur.

4-2-2 Allgemeine Methode

Die zuvor beschriebenen Hypothesen werden in Experimentalblock II adressiert (s. Abschnitt 4-2-3). Da die allgemeine Methode zur Herstellung der Stimuli sowie Versuchsaufbau und die Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle nicht nur gültig ist für Experimentalblock II, sondern auch für das in Abschnitt 4-2-4 beschriebene Experiment zum Einfluss zusätzlicher taktiler Reize (Experimentalblock III), wird die allgemeine Methode beiden Studien

vorangestellt. Abweichungen sowie genaue Spezifikationen werden in den einzelnen Abschnitten näher beleuchtet.

Stimulusmaterial. Um die Diskriminierungsfähigkeit von nachgiebigen Objekten zu erheben, wurden Silikonwürfel aus zwei unterschiedlichen Silikongummilösungen mit Shore-A Härte von 12 und 60 (Elastosil® M4511 and Elastosil® M4470, Wacker Silicones) produziert (s. Abbildung 4-6A). Um Abstufungen zwischen den Nachgiebigkeiten der Grundlösungen zu erhalten, wurden zum einen unterschiedliche Mengen an Flüssigmacher (Silikonöl AK 350, Wacker Silicones) hinzu gegeben, zum anderen die beiden Silikongrundlösungen gleichfalls miteinander vermischt und mit Silikonöl verdünnt. Bei Raumtemperatur verfestigte sich das Silikon über eine Dauer von 24 Stunden. Die 30 bzw. 31 derart hergestellten Reize unterschieden sich lediglich in ihrer Nachgiebigkeit nicht jedoch in Form, Oberflächentextur oder thermischer Leitfähigkeit.

Die Nachgiebigkeit wurde bestimmt durch Aufzeichnen der Kraft, die nötig ist, um einen kugelförmigen Probekörper mit einem Durchmesser von 25.4 mm 20 mm in den Würfel einzudrücken (s. Anhang B1). Die genauen experimentalspezifischen Daten dieser Stimuli sind in den betreffenden Abschnitten ausgeführt und können Anhang B2 und B4 entnommen werden.

Versuchsaufbau. Zur Kontrolle der Hauttemperatur wurde das in Abschnitt 4-1-2 vorgestellte Temperaturdisplay herangezogen. Die Temperatur der Haut wurde mit einem digitalen Präzisionsthermometer (s. Abschnitt 4-1-2) gemessen; das Gerät hat eine Auflösung von 0.1°C, eine Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ und einen Messbereich von -200°C bis 850°C .

Um die beim Ausüben von Druck aufgebrauchten Kräfte zu messen, wurde eine Präzisionswaage (Typ 440-53N, Firma Kern) mit einer Auflösung von 1 mN und einer messbaren Maximalkraft von 53 N verwendet, auf der die Silikonwürfel den Probanden präsentiert wurden (s. Abbildung 4-6B). Die Werte wurden digital über eine serielle Schnittstelle auf den PC übertragen und gespeichert.

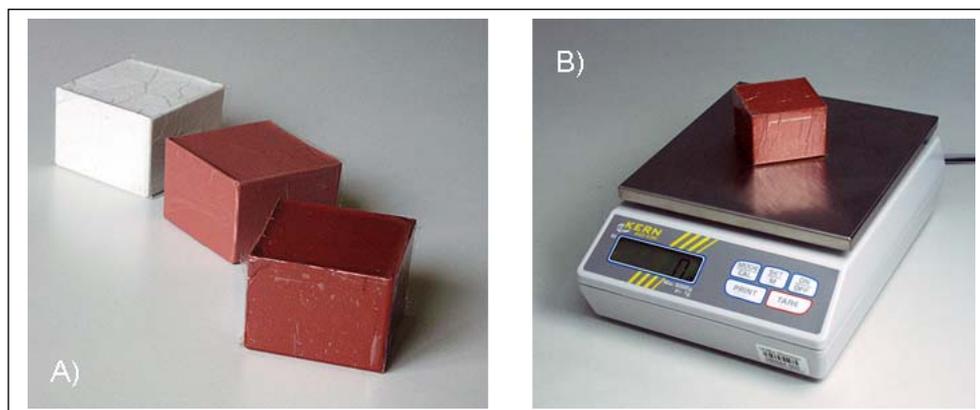


Abb. 4-6 Silikonwürfel unterschiedlicher Nachgiebigkeit: A) drei ausgewählte Würfel (weiß – Grundlösung Shore-A 12; rot – Grundlösung Shore-A 60; rosa – Mischung aus beiden Grundlösungen). B) Apparatur zum Messen der von den Probanden durch Ausüben von Druck (Gruppe PR) aufgebrauchten Kräfte.

Zur Präsentation der Reize und erneut zum Ausschließen visueller Cues beim Diskriminieren wurde die in Abschnitt 4-1-2 vorgestellte Experimentalbox verwendet. Die Stimuli wurden den Probanden hinter dem Vorhang parallel zur Oberfläche des Tisches präsentiert.

Experimenteller Ablauf. Die Probanden wurden instruiert, die Würfel entweder zwischen Daumen und Zeigefinger einmal mit mittlerer Kraft zu greifen oder mit dem Zeigefinger ein-

mal auf die obere Fläche des Würfels mit mittlerer Kraft zu drücken. Vor der eigentlichen Testung erfolgte ein kurzes Training, um die Probanden mit dem genauen Ablauf vertraut zu machen. Außerdem wurde die Fingertemperatur adaptiert. Die Kontrolle der Temperatur erfolgte nach der ca. 5-minütigen Adaptation sowie im Anschluss an die Testung. Da die Raumtemperatur nicht konstant gehalten werden konnte, wurde sie ebenfalls mitprotokolliert. Um Hintergrundreize auszuschalten, trugen die Probanden schalldichte Kopfhörer, über die ihnen Weißes Rauschen und die auditiven Signale zum Start und Ende eines Trials dargeboten wurden. Die Zeit für das Explorieren der Nachgiebigkeit pro Würfel betrug eine Sekunde mit einem Interstimulus-Intervall von 3 Sekunden. Das Intertrial-Intervall lag wie in Abschnitt 4-1-2 bei 5 Sekunden, um die Readaptation der Fingerspitzen zu gewährleisten. Am Ende eines Trials gab der Proband an, ob er einen Unterschied bezüglich der Nachgiebigkeit des Objektes wahrgenommen hatte oder nicht.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Die Unterschiedsschwellen wurden getrennt für die jeweiligen Experimentalbedingungen erhoben. Als Verfahren zur Ermittlung der Unterschiedsschwelle wurde aufgrund ihrer Genauigkeit und relativen Schnelligkeit beim Ermitteln des Schwellwerts die klassische Grenzmethode (vgl. Abschnitt 3-1-2-1) ausgewählt. Je vier auf- und absteigende Sequenzen wurden pro Standardreiz zur Bestimmung der Schwelle herangezogen. Eine absteigende Sequenz begann jeweils mit dem sechsten Reiz oberhalb des Standardreizes, die aufsteigende Reihe mit zweimaliger Darbietung des Standardreizes. Mit der dritten gleichen Antwort („Ja“ bei aufsteigend und „Nein“ bei absteigend) endete eine Sequenz. Die Darbietung der Sequenzen sowie die Position des Standardreizes in einem Trial (an erster oder zweiter Stelle) erfolgten vollständig randomisiert. Als Schwellwert wurde der Mittelwert aller Übergangspunkte der auf- und absteigenden Reihen definiert; dies entspricht der Wahrscheinlichkeit, in 50% der Fälle einen Unterschied zu detektieren.

4-2-3 Experimentalblock II – Auflösungsvermögen von Objektnachgiebigkeit

4-2-3-1 Methode

Stimulusmaterial. Die endgültigen Silikonwürfel (s. Abbildung 4-6A) maßen 5 x 5 cm Länge mal Breite und 3.5 cm Höhe. Da das Beimengen von Silikonöl die Oberfläche hatte ölig werden lassen, wurden alle Würfel mit einem dünnen Plastikfilm überzogen. Die genauen Mischverhältnisse für das Herstellen der Proben können Anhang B2 entnommen werden. In Tabelle 4-11 sind die für das Experiment produzierten Nachgiebigkeiten der Silikonwürfel zusammengetragen. Als Reizproben mit Standardnachgiebigkeit wurden sechs unterschiedliche Nachgiebigkeiten ausgewählt: Drei Silikonwürfel mit geringer Nachgiebigkeit (< 0.16 mm/N) und drei mit hoher Nachgiebigkeit (> 0.16 mm/N).

Versuchsdesign. Die aufgrund der Fragestellungen zu manipulierenden Faktoren sind *Explorationsmethode* (Ausüben von Druck, Greifen), *adaptierte Fingertemperatur* (normal, reduziert, erhöht) sowie *Standardnachgiebigkeit*, deren Einfluss auf die Sensitivität untersucht werden soll. In Anlehnung an die Literatur und Abschnitt 4-1 wurden erneut als Fingertemperaturen 20°C und 37°C ausgewählt; die Normaltemperatur liegt bei 32-34°C (s. Abschnitt 2-5).

Explorationsmethode sowie Fingertemperatur wurden aus ökonomischen Gründen als Zwischengruppen festgelegt. Standardnachgiebigkeit war Innersubjektfaktor; die einzelnen ausgewählten Standardreize betragen in ihrer Nachgiebigkeit 0.018, 0.058, 0.108, 0.254, 0.505, 0.826 mm/N.

Tabelle 4-11 Rangnummer (Nr.) sowie Nachgiebigkeit (mm/N) der im Experiment verwendeten Reizproben. Reize mit Standardnachgiebigkeit sind fettgedruckt.

Geringe Nachgiebigkeit (< 0.16 mm/N)										
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
mm/N	0.018	0.026	0.029	0.050	0.058	0.065	0.073	0.108	0.117	
Hohe Nachgiebigkeit (> 0.16 mm/N)										
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mm/N	0.144	0.158	0.233	0.254	0.270	0.328	0.365	0.406	0.505	0.573
Nr.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
mm/N	0.606	0.741	0.826	0.901	1.093	1.639	1.709	1.980	2.381	

Statistische Analyse. Als erstes wurde überprüft, ob die Kontrolle der Fingertemperatur effektiv war (s. Abschnitt 4-2-3-3). In einem zweiten Schritt wurden die individuellen Unterschiedsschwellen (DL) am jeweiligen Standardreiz relativiert und somit in Weber-Brüche umgerechnet (s. deskriptive Darstellung in Abschnitt 4-2-3-4).

Um die Fragestellungen zu testen, wurde zusätzlich nach dem Index der Entdeckbarkeit d' ausgewertet (nach Formel (7)); d' gibt als relativ antwortendenzunabhängiges Maß Aufschluss über die Sensitivität. Der Einfluss der Faktoren *Fingertemperatur* und *Explorationsmethode* sowie dem Messwiederholungsfaktor *Standardnachgiebigkeit* wurde zuerst auf die Sensitivität (d') anhand einer dreifaktoriellen ANOVA überprüft (s. Abschnitt 4-2-3-5). Im Anschluss daran wurde die Veränderung der aufgewandten Kraft bei Variation der adaptierten Fingertemperatur, sowie der während des Experiments dargebotenen Reizproben mit zweifaktoriellen ANOVA untersucht. Sowohl für den Einfluss auf den Index der Entdeckbarkeit als auch auf die aufgewandte Kraft wird, bei signifikantem Einfluss des Standardreizes, getrennt für Nachgiebigkeiten größer und kleiner als 0.16 mm/N der Einfluss des Standardreizes überprüft. Die F-Statistiken werden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Es wird auf dem Signifikanzniveau von 5% getestet.

4-2-3-2 Stichprobe

Am Experimentalblock II „Auflösungsvermögen von Objektnachgiebigkeit – Einfluss von Explorationsmethode und Fingertemperatur“ nahmen 48 Studenten der Universität der Bundeswehr teil. Die Hälfte untersuchte die Nachgiebigkeit der Würfel durch Greifen (Gruppe PI). Die Finger von 4 Männern und 4 Frauen wurde gekühlt (20°C); sie waren im Mittel 23 Jahre alt. Bei 7 Männern und einer Frau, im Mittel 24 Jahre alt, wurde auf die Fingertemperatur auf 32°C adaptiert. Mit auf 37°C erwärmten Fingern untersuchten weitere 4 Männer und 4 Frauen die Objektnachgiebigkeit durch Greifen; ihr mittleres Alter betrug 23 Jahre.

24 Probanden explorierten die Nachgiebigkeit der Würfel durch Ausüben von Druck (Gruppe PR). Mit auf 20°C gekühlter Fingerspitze explorierten 5 Männer und 3 Frauen die Würfel; sie waren im Mittel 24 Jahre alt. 7 Männer und eine Frau, im Mittel 23 Jahre alt, untersuchten die Würfel mit auf 32°C adaptierten Fingern. Die Finger der letzten 7 Männer und einer Frau wurde auf 37°C adaptiert; sie waren im Mittel 24 Jahre alt.

4-2-3-3 Kontrolle der Fingertemperatur

Die Raumtemperatur lag im Mittel bei 21°C (sd = 0.7°C). Die Fingertemperatur aller Probanden wurde während des Experimentes kontrolliert; die Messwerte können Anhang B3 entnommen werden. Die gemessene Fingertemperatur unterschied sich statistisch signifikant über alle drei Temperaturgruppen, wenn durch Greifen ($\chi^2=19.0$, $p<0.05$) oder durch Ausüben von Druck exploriert wurde ($\chi^2=17.4$, $p<0.05$). Einzelvergleiche über Mann-Whitney U-Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen allen drei adaptierten Temperaturen innerhalb beider Explorationsgruppen (PR, PI).

Die Variation der Fingertemperatur unterscheidet sich nicht zwischen den beiden Explorationsgruppen, jedoch in Abhängigkeit der über das Temperaturdisplay dargestellten Temperatur; die Fingertemperatur wurde erfolgreich und in der gewünschten Weise variiert.

4-2-3-4 Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche

In Tabelle 4-12 können die Mittelwerte sowie Standardabweichungen der Weber-Brüche entnommen werden. Werden Objekte mit hoher Nachgiebigkeit (> 0.16 mm/N) exploriert, können bereits Unterschiede von ca. 30% wahrgenommen werden. Bei Objekten geringer Nachgiebigkeit (< 0.16 mm/N) zeigt sich eine starke Zunahme der Unterschiedsschwelle auf ca. 50%. Die niedrigen Weber-Brüche von 0.14 bei Objekten mit der geringsten Nachgiebigkeit (0.018 mm/N) ist auffällig.

Tabelle 4-12 Weber-Brüche für unterschiedliche Fingertemperaturen sowie bei Ausüben von Druck oder Explorieren durch Greifen.

		20°C		32°C		37°C	
		MW	sd	MW	sd	MW	sd
Ausüben von Druck	0.018 mm/N	0.10	0.06	0.15	0.13	0.16	0.13
	0.058 mm/N	0.49	0.08	0.47	0.27	0.54	0.28
	0.108 mm/N	0.49	0.16	0.53	0.15	0.46	0.22
	0.254 mm/N	0.28	0.04	0.28	0.13	0.26	0.05
	0.505 mm/N	0.27	0.05	0.27	0.09	0.30	0.06
	0.826 mm/N	0.38	0.06	0.21	0.09	0.42	0.09
Greifen	0.018 mm/N	0.18	0.10	0.13	0.08	0.10	0.10
	0.058 mm/N	0.51	0.09	0.54	0.17	0.48	0.10
	0.108 mm/N	0.60	0.17	0.55	0.21	0.56	0.13
	0.254 mm/N	0.24	0.05	0.27	0.12	0.29	0.10
	0.505 mm/N	0.31	0.10	0.28	0.10	0.28	0.07
	0.826 mm/N	0.36	0.13	0.33	0.15	0.37	0.12

Wie in Abbildung 4-7 ersichtlich, zeigt sich kaum eine Abhängigkeit der Weber-Brüche von der adaptierten Fingertemperatur. Lediglich wenn sehr weiche Objekte über Ausüben von Druck untersucht werden, scheint Kühlung wie Erwärmung zu einer Abnahme der Sensitivität zu führen. Auch die Explorationsmethode scheint keinen Einfluss auf die Diskriminierungsleistung zu haben.

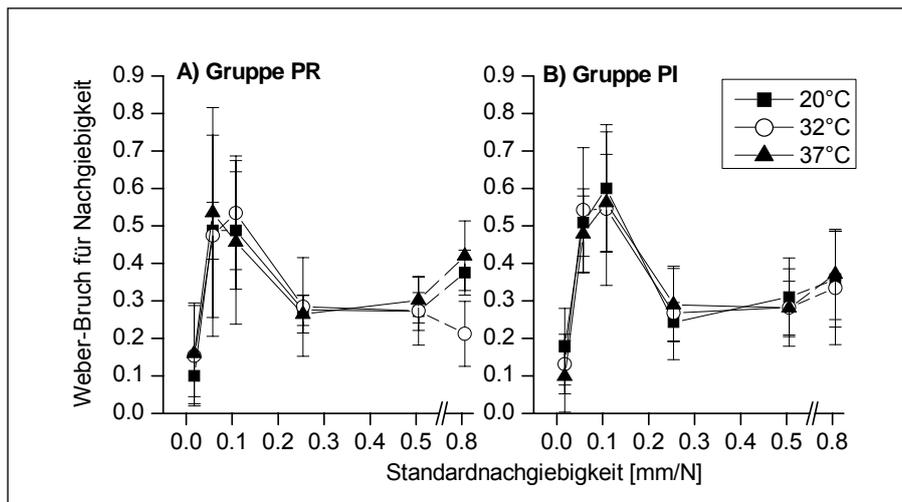


Abb. 4-7 Weber-Brüche in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit, wenn die Objekte A) durch Ausüben von Druck und B) durch Greifen exploriert werden.

4-2-3-5 Einfluss von Explorationsmethode und Fingertemperatur

Sensitivität (d’). Für die einzelnen Standardnachgiebigkeiten für jede Gruppe wurde der Index der Entdeckbarkeit d’ ermittelt und in Abbildung 4-8 dargestellt. Hierbei stehen hohe Werte für eine hohe Sensitivität. Manipulation der Fingertemperatur scheint keinen Einfluss auf die Sensitivität auszuüben. Eine leichte Tendenz zu höherer Sensitivität zeichnet sich mit zunehmender Nachgiebigkeit ab sowie, wenn durch Ausüben von Druck exploriert wird (vgl. Abbildung 4-8A).

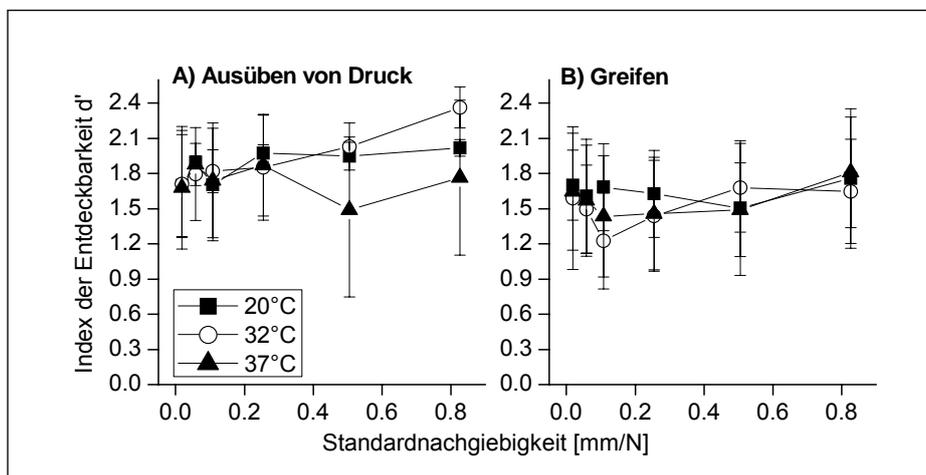


Abb. 4-8 Index der Entdeckbarkeit d’ für die Experimentalgruppen, d.h. adaptierte Fingertemperatur und Explorationsmethode: A) Ausüben von Druck und B) Greifen des Objektes.

In Tabelle 4-13 sind die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA aufgelistet. Der Einfluss der Explorationsmethode wird statisch signifikant (mittlere Effektstärke): Die Sensitivität ist dabei höher, wenn das Objekt durch Ausüben von Druck untersucht wird. Auch Standardnachgiebigkeit beeinflusst d’ signifikant, erklärt jedoch keinerlei Varianz (geringe Effektstärke). Kein anderer Effekt wird statistisch bedeutsam.

Tabelle 4-13 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Explorationsmethode EM (2)	19.14 (1,42)	< 0.05	0.313
HE Standardnachgiebigkeit (6)	2.72 (5,210)	< 0.05	0.061
WW EM x Temperatur	1.45 (2,42)	0.245	0.065
HE Temperatur (3)	1.04 (2,42)	0.363	0.047
WW Nachgiebigkeit x Temperatur	0.89 (10,210)	0.545	0.041
WW Nachgiebigkeit x EM x Temperatur	0.90 (10,210)	0.531	0.041
WW Nachgiebigkeit x EM	0.96 (5,210)	0.445	0.022

Aufgewendete Kraft beim Drücken. Die mittlere aufgewandte Kraft wurde in der Gruppe PR wie in Abschnitt 4-2-2 beschrieben erfasst. Wurde die Fingertemperatur auf 32°C adaptiert, betragen die aufgewandten Kräfte im Mittel 15 N (sd = 7N), bei Kühlung auf 20°C 29 N (sd = 4 N) und bei Erwärmung auf 37°C 26 N (sd = 6 N).

In Abbildung 4-9 zeigt sich die Abhängigkeit der Kraftaufwendung von sowohl der Nachgiebigkeit des Objektes als auch von der adaptierten Fingertemperatur. Für Nachgiebigkeiten kleiner als 0.16 mm/N sind die Kräfte im Allgemeinen höher und scheinen unabhängig von der Nachgiebigkeit zu sein, während die aufgewandten Kräfte für weichere Proben mit zunehmender Weichheit abnehmen. Sowohl Kühlung als auch Erwärmung der Fingertemperatur resultierten in einer Erhöhung der Kraftaufwendung.

Eine ANOVA über den Messwiederholungsfaktor Reiz (Nachgiebigkeit) und dem Gruppenfaktor Fingertemperatur zeigte einen signifikanten Einfluss der Reizgröße (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(5.0,104.0)=15.45$, $p<0.05$; $\eta^2=0.425$), ebenfalls der Temperatur ($F(1,21)=13.05$, $p<0.05$; $\eta^2=0.554$), nicht jedoch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(9.9,104.0)=15.49$, $p=0.305$).

Die Kraftaufwendung für härtere Objekte (< 0.16 mm/N) zeigte keine Abhängigkeit mehr von der Reizgröße (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3.8, 80.5)=0.76$, $p=0.551$). Reizgröße beeinflusste bei weichen Objekten (> 0.16 mm/N) signifikant die Kraftaufwendung (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3.4, 71.3)=16.6$, $p<0.05$; $\eta^2=0.441$): Mit zunehmender Nachgiebigkeit nimmt die Kraftaufwendung linear ab ($F(1,21)=33.89$, $p<0.05$; $\eta^2=0.617$).

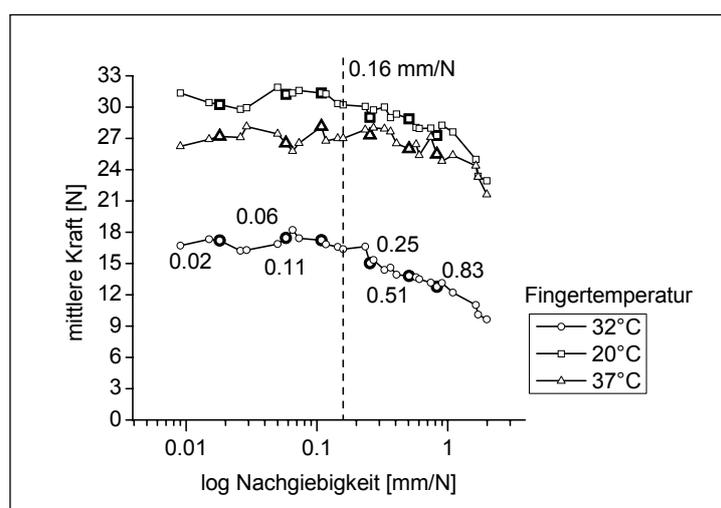


Abb. 4-9 Mittlere aufgewandte Kraft [N] beim Testen der einzelnen Silikonwürfel in Abhängigkeit der adaptierten Fingertemperatur bei Exploration durch Ausüben von Druck: Die Standardnachgiebigkeiten sind mit ausgefüllten Zeichen dargestellt.

4-2-3-6 Diskussion der Ergebnisse

Objekte hoher Nachgiebigkeit (> 0.16 mm/N) können mit ca. 30% Unterschied voneinander diskriminiert werden, während ca. 50% Abweichung nötig ist, um harte Objekte voneinander unterscheiden zu können. Die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle von den Standardreizen deckt sich mit den Ergebnissen der Literatur (vgl. Abschnitt 4-3-1-2). Eine Ausnahme bildeten Standardnachgiebigkeiten von 0.018 mm/N: Bereits 14% Unterschiede konnten erkannt werden. Diese hohe Diskriminierungsleistung ist auffällig und nicht geklärt. Eine vergleichsweise höhere Sensitivität (d') konnte nicht gefunden werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-14 zusammengestellt.

Tabelle 4-14 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock II „Auflösungsvermögen von Objektnachgiebigkeit – Einfluss von Explorationsmethode und Fingertemperatur“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
II-1 Nachgiebige und gering nachgiebige Objekte werden mit unterschiedlicher Sensitivität voneinander unterschieden	n. bestätigt	
II-2 Ausüben von Druck mittels eines Fingers führt zu höherer Sensitivität als das Greifen des Objektes	bestätigt	$\eta^2=0.31$
II-3 Harte Objekte werden besser durch Greifen diskriminiert, weiche besser durch Ausüben von Druck	n. bestätigt	
II-4 Bei Ausüben von Druck verändert sich die aufgewendete Kraft in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit	bestätigt	$\eta^2=0.43$
II-5 Manipulation der Fingertemperatur führt zu einer generellen Reduktion der Sensitivität	n. bestätigt	
II-6 Bei normaler Fingertemperatur werden beim Explorieren durch Ausüben von Druck durchschnittlich geringere Kräfte ausgeübt	bestätigt	$\eta^2=0.55$

Einfluss der Standardnachgiebigkeit. Ein Einfluss der Standardnachgiebigkeit auf die Sensitivität (d') war erwartet worden (Hypothese II-1), bleibt jedoch aufgrund mangelnder Effektstärke uninterpretierbar. Dem entgegen zeigte sich eine Variation der Kraftaufwendung in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit: Harte Objekte wurden mit relativ konstanter Kraft penetriert, während weiche Objekte mit abnehmender Kraft exploriert wurden, je weicher das Objekt wurde (Hypothese II-4). Dies deutet darauf hin, dass eine höhere Sensitivität durch ein Anpassen der aufgewendeten Kräfte erreicht worden sein könnte.

Einfluss der Explorationsmethode. Am meisten Varianz erklärte die verwendete Explorationsmethode: Wurden Objekte durch Ausüben von Druck untersucht, war die Sensitivität signifikant höher als bei Explorieren durch Greifen (Hypothese II-2). Obwohl ein differentieller Einfluss der Explorationsmethode in Abhängigkeit der Standardtextur erwartet worden war, konnte die Hypothese (II-3) nicht bestätigt werden.

Einfluss der Fingertemperatur. Ein Einfluss der adaptierten Fingertemperatur auf die Sensitivität (d') konnte nicht bestätigt werden (Hypothese II-5). Stattdessen zeigte sich eine signifikante Erhöhung der aufgewendeten Kräfte bei Fingertemperaturen adaptiert an 20°C oder 37°C (Hypothese II-6). Dieser Einfluss ist unabhängig von der Standardnachgiebigkeit, was darauf hindeutet, dass die Probanden bei reduzierter Fingersensitivität höhere Kräfte auf-

wandten, um die Objektnachgiebigkeit dennoch diskriminieren zu können. Ein ähnliches Ergebnis berichten auch Williams, et al. (1991).

Wird die Nachgiebigkeit von Objekten durch Ausüben von Druck exploriert, variierte die Kraft in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit (vgl. Chib et al., 2004; Fujita & Oyama, 1999):

- a. Harte Objekte wurden durch Aufwenden konstanter Kraft untersucht (höhere Weber-Brüche sind für die Diskriminierung nötig),
- b. während weiche Objekte durch Anpassung der Druckkraft untersucht wurden (geringere Weber-Brüche sind für die Diskriminierung nötig).

Obwohl eine Reduktion der Fingersensitivität durch Kühlung oder Erwärmung der Haut keinen Einfluss auf d' oder die Weber-Brüche hat, führte sie generell zu einer erhöhten Kraftaufwendung.

Zusammengenommen bedeutet dies, um eine höhere Sensitivität zu erhalten, sollten nachgiebige Objekte eher durch Aufwenden von Druck diskriminiert werden. Wird eine eher geringe Kraftaufwendung gewünscht, sollte die Fingertemperatur im Normalbereich konstant gehalten werden.

4-2-4 Experimentalblock III – Einfluss zusätzlicher taktiler Information

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Einfluss der Fingertemperatur auf die Sensitivität geprüft. Es war angenommen worden, dass sich die Sensitivität bei Abweichungen der Fingertemperatur von der Normaltemperatur reduziert. Ein Temperatureinfluss auf das Auflösungsvermögen konnte jedoch nur indirekt bestätigt werden: Die Probanden kompensierten die reduzierte Fingersensitivität durch erhöhtes Aufbringen von Kraft beim Explorieren. Darüber hinaus wurde bereits gezeigt, dass nachgiebige Objekte auch dann mit vergleichbarer Genauigkeit diskriminiert werden können, wenn ihre Oberfläche nicht deformierbar ist (z.B. Roland & Ladegaard-Pederson, 1977). Zusätzliche taktile Informationen auf der Objektoberfläche könnten die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit beeinträchtigen, da Partikel auf der Oberfläche wiederum von den Merkel-Zellen detektiert werden können.

Es wird erwartet, dass zusätzliche Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit eines nachgiebigen Objektes ablenkend wirken. Eine gegenseitige Beeinflussung von Textur und Härte sind bereits aus der Literatur bekannt (z.B. Lederman & Klatzky, 1993; Lederman, Klatzky & Reed, 1993; Reed, Lederman & Klatzky, 1990; Klatzky, Lederman & Reed, 1989). Beide Objekteigenschaften werden bidirektional integriert, was zu einer reduzierten Trennbarkeit führen kann.

Hypothese III-1: Zusätzliche aufgabenirrelevante taktile Informationen führen zu einer reduzierten Sensitivität, außerdem zu einer allgemeinen höheren Kraftaufwendung (bei Ausüben von Druck).

Darüber hinaus wird erwartet, dass der Einfluss zusätzlicher taktiler Informationen abhängig vom Standardreiz ist: Bei harten Objekten sollte die Sensitivität stärker beeinträchtigt sein.

Hypothese III-2: Der Einfluss zusätzlicher taktiler Informationen ist abhängig von der Standardnachgiebigkeit.

4-2-4-1 Methode

Stimulusmaterial. Um den Einfluss zusätzlicher taktiler Informationen auf die Diskriminierungsleistung testen zu können, wurden zwei Sätze an Silikonwürfeln, 31 Würfel mit und 31 Würfel ohne zusätzliche Textur, hergestellt (s. Anhang B4). Die Nachgiebigkeit der Proben war identisch; es wurden aus demselben Mischverhältnis stets eine Probe mit und eine ohne Textur produziert. Die Silikonwürfel maßen 5 x 5 cm Länge mal Breite und 4 cm in der Höhe.

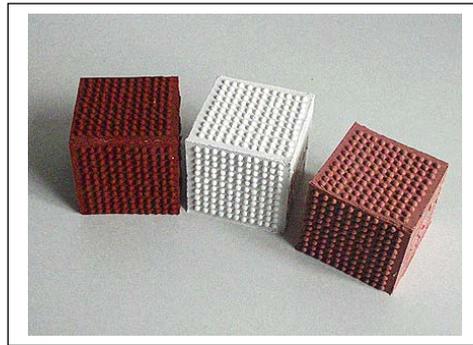


Abb. 4-10 Reizproben mit Textur und unterschiedlicher Nachgiebigkeit.

Oberflächentextur wurde definiert über ein gleichmäßiges Muster von Pins mit einer Pin-Breite von 3 mm und einem Pin-Abstand von 1.5 mm; sie bedeckte drei Seiten der Silikonwürfel (s. Abbildung 4-10). Da, wie bereits in Abschnitt 4-2-3-1 erwähnt, das Beimengen von Silikonöl die Oberfläche ölig werden ließ, wurden alle Würfel mit einer dünnen Puderschicht überzogen. In Tabelle 4-15 sind die für das folgende Experiment ausgewählten Standardnachgiebigkeiten wiedergegeben. Als Standardreize wurden sechs unterschiedliche Nachgiebigkeiten ausgewählt, von denen drei im Bereich geringer Nachgiebigkeit (< 0.16 mm/N) und drei im Bereich hoher Nachgiebigkeit (> 0.16 mm/N) liegen.

Tabelle 4-15 Rangnummer (Nr.) sowie Nachgiebigkeit (mm/N) der im Experiment verwendeten Reize. Standardreize sind fettgedruckt. Die Nachgiebigkeit der einzelnen Reizproben unterscheidet sich für Proben mit Textur, ohne Textur.

Geringe Nachgiebigkeit (< 0.125 mm/N)								
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
mm/N	0.012	0.017	0.021	0.027	0.039	0.046	0.059	0.110
Hohe Nachgiebigkeit (> 0.125 mm/N)								
Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
mm/N	0.159	0.204	0.217	0.250	0.281	0.289	0.296	0.325
Nr.	17	18	19	20	21	22	23	24
mm/N	0.335	0.356	0.437	0.443	0.504	0.531	0.561	0.635
Nr.	25	26	27	28	29	30	31	
mm/N	0.729	0.776	0.845	0.891	1.260	1.319	1.467	

Versuchsdesign. Die aufgrund der Fragestellungen zu manipulierenden Faktoren sind Oberflächentextur (mit, ohne Textur), deren Einfluss auf die Sensitivität untersucht werden soll, und zusätzlich (in Anlehnung an Abschnitt 4-2-3) die Explorationsmethode (Ausüben von Druck, Greifen). Um einen Einfluss der Fingertemperatur (s. Abschnitt 4-2-3) zu reduzieren, werden die Finger der Probanden an die Normaltemperatur (32-34°C) adaptiert. Die Explorationsmethode war Zwischengruppenfaktor, die Oberflächentextur Innersubjektfaktor.

Auch die Standardnachgiebigkeit wurde als Innersubjektfaktor ausgewählt; die einzelnen Standardreize hatten Nachgiebigkeiten von 0.012, 0.039, 0.110, 0.250, 0.504, 0.776 mm/N.

Statistische Analyse. Die individuelle Unterschiedsschwelle (DL) wurde am jeweiligen Standardwert relativiert und als Weber-Brüche deskriptiv dargestellt (s. Abschnitt 4-2-4-3). Um die Sensitivität bei der Nachgiebigkeitsdiskriminierung zu erheben, wird wie in Abschnitt 4-2-3 nach dem Index der Entdeckbarkeit d' ausgewertet. Der Einfluss der Faktoren *Standardnachgiebigkeit* und *Oberflächentextur* sowie des Gruppenfaktors *Explorationsmethode* (Greifen, Ausüben von Druck) auf die Sensitivität (d') wird mit einer weiteren ANOVA mit Messwiederholung untersucht (s. Abschnitt 4-2-4-4). Inwiefern Standardnachgiebigkeit und Oberflächentextur die beim Ausüben von Druck entstehenden Kräfte beeinflusst, wurde im Anschluss daran geprüft. Bei einem signifikanten Einfluss des Standardreizes auf entweder den Index der Detektabilität oder die aufgewendeten Kräfte wird zusätzlich der Einfluss von Nachgiebigkeiten größer und kleiner 0.16 mm/N getestet. Alle F-Statistiken wurden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

4-2-4-2 Stichprobe.

Am Experimentalblock III „Auflösungsvermögen von Objektnachgiebigkeit – Einfluss von Textur“ nahmen insgesamt 20 Studenten der Universität der Bundeswehr München und deren Angehörige teil. Je die Hälfte der Probanden wurde zufällig den beiden Gruppenbedingungen G und D (Explorieren durch Greifen G oder durch Drücken D) zugewiesen; 2 Personen (je aus einer der beiden Gruppen) mussten von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden, da zu viele Schwellen nicht ermitteln werden konnten. Das durchschnittliche Alter betrug 24 Jahre bei Gruppe D und 23 Jahre bei Gruppe G. Jeweils 8 Männer und eine Frau partizipierten.

Die Raumtemperatur lag im Mittel bei allen Personen und Sitzungsterminen bei 22°C (sd = 1°C).

Die Fingertemperatur vor Temperaturadaptation lag bei Gruppe G bei 25°C (sd = 4.0°C) und bei Gruppe D um 28°C (sd = 3.4°C). Nach Adaptation betrug die Fingertemperatur 31°C (sd = 3.7°C) in Gruppe D und 32°C (sd = 2.3°C) in Gruppe G. Zu Experimentende wurden 31°C (sd = 1.7°C) in Gruppe D und 31°C (sd = 2.5°C) in Gruppe G gemessen. Die Temperaturkontrolle kann als effektiv betrachtet werden.

4-2-4-3 Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche

In Tabelle 4-16 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Weber-Brüche in Abhängigkeit der Gruppenbedingung Explorationsmethode, sowie der Innersubjektbedingungen Standardnachgiebigkeit und Textur zusammengefasst. Wie in Abschnitt 4-2-3 liegen die Weber-Brüche bei ca. 0.30 für Nachgiebigkeiten unter 0.16 mm/N und steigen bei abnehmender Nachgiebigkeit sehr rasch an. Bemerkenswert sind die geringen Weber-Brüche bei der Wahrnehmung der weichsten Standardreizklasse (0.776 mm/N).

Tabelle 4-16 Weber-Brüche beider Experimentalgruppen (Exploration durch Drücken oder Greifen) für Würfel mit oder ohne Textur in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeiten.

		mit Textur		ohne Textur	
		MW	sd	MW	sd
Ausüben von Druck	0.012 mm/N	2.19	0.79	1.92	0.95
	0.036 mm/N	1.41	0.64	1.32	0.81
	0.110 mm/N	0.65	0.22	0.75	0.25
	0.250 mm/N	0.25	0.07	0.26	0.06
	0.504 mm/N	0.28	0.12	0.28	0.09
	0.776 mm/N	0.08	0.03	0.19	0.07
Greifen	0.012 mm/N	1.16	0.41	1.30	0.32
	0.036 mm/N	1.16	0.35	0.96	0.17
	0.110 mm/N	0.66	0.19	0.67	0.16
	0.250 mm/N	0.22	0.04	0.24	0.06
	0.504 mm/N	0.24	0.09	0.18	0.08
	0.776 mm/N	0.07	0.04	0.25	0.06

In Abbildung 4-11 wird ersichtlich, dass sich zum einen die beiden Gruppen erneut in ihrer Leistung zu unterscheiden scheinen: Dieses Mal (im Vergleich zu Abschnitt 4-2-3) zeigte die Gruppe Greifen eine höhere Diskriminierungsleistung.

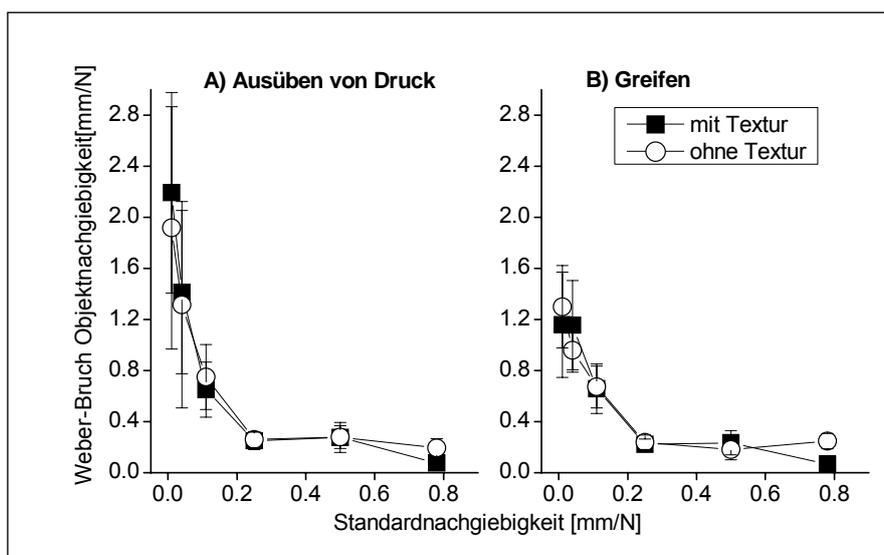


Abb. 4-11 Weber-Brüche in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit sowie der Oberflächentextur der Würfel, wenn die Objekte A) durch Ausüben von Druck und B) durch Greifen exploriert werden.

4-2-4-4 Einfluss von Textur und Explorationsmethode

Sensitivität (d'). In Abbildung 4-12 ist die Sensitivität (d') in Abhängigkeit der experimentellen Bedingungen dargestellt. Im vorangegangenen Abschnitt wurde auf den geringen Weber-Bruch bei sehr weichen Objekten hingewiesen; derselbe Effekt lässt sich bei Sensitivität (d') zeigen. Besonders bei der Gruppe G ist die Sensitivität bei einer Standardnachgiebigkeit von 0.776 mm/N sehr viel höher, wenn die Reizproben keine zusätzliche Textur aufweisen. Dies deutet auf eine hohe Trefferrate und niedrige Falschalarmrate hin (besonders bei Gruppe G), d.h. der Standardwürfel wird in nahezu allen Darbietungen von dem ersten Vergleichswürfel

unterschieden. Aus diesem Grund wird der Standardreiz 0.776 mm/N von der weiteren (statistischen) Analyse ausgeschlossen.

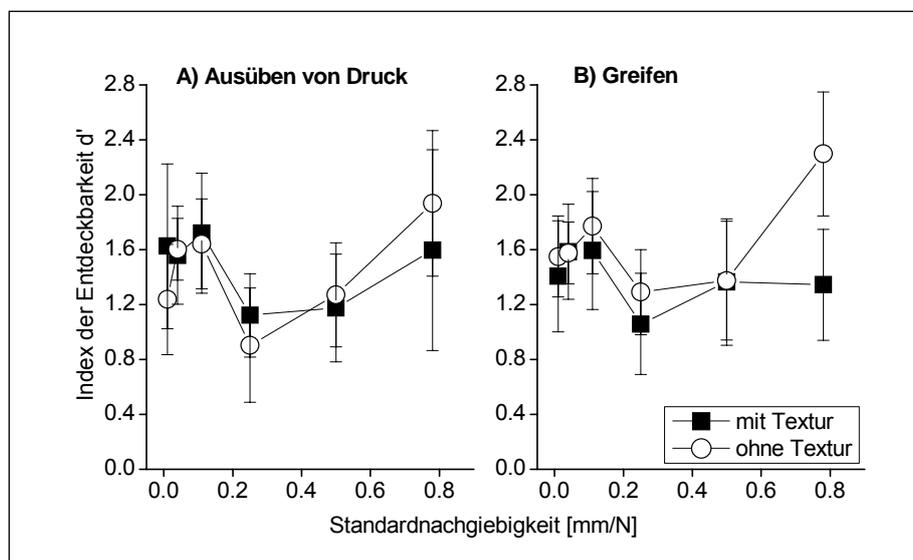


Abb. 4-12 Index der Entdeckbarkeit d' in Abhängigkeit der Objektart (mit, ohne Textur) für die Experimentalgruppen: Explorieren durch A) Ausüben von Druck und B) Greifen.

In Tabelle 4-17 sind die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA aufgelistet. Die Sensitivität (d') ändert sich in Abhängigkeit der dargebotenen Standardnachgiebigkeit; dieser Effekt erklärt den größten Teil der Gesamtvarianz. Die Interaktion zwischen Textur und Explorationsmethode, obzwar gerade signifikant und mit einer geringen Effektstärke, geht auf eine höhere Sensitivität beim Greifen der nachgiebigen Objekte zurück, wenn die Nachgiebigkeit größer ist als 0.16 mm/N, d.h. für weichere Objekte. Kein anderer Effekt beeinflusst die Sensitivität statistisch signifikant.

Tabelle 4-17 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Standardnachgiebigkeit (4)	21.66 (4,64)	< 0.05	0.546
WW Textur x EM	4.43 (1,16)	0.050	0.198
HE Textur (2)	0.01 (1,16)	0.982	0.000
HE Explorationsmethode EM (2)	1.01 (1,16)	0.327	0.053
WW Nachgiebigkeit x Textur x EM	1.19 (4,72)	0.324	0.062
WW Nachgiebigkeit x Textur	0.31 (4,72)	0.872	0.017
WW Nachgiebigkeit x EM	0.61 (4,64)	0.654	0.033

Um den Einfluss der Standardnachgiebigkeit für Werte größer bzw. kleiner 0.16 mm/N näher zu bestimmen, wird ein Kontrasttest über die Sensitivität (d') für Reize mit Nachgiebigkeiten größer und kleiner 0.16 mm/N gerechnet. Der Haupteffekt Nachgiebigkeit wird signifikant ($F(1,18)=109.19$, $p<0.05$, $\eta^2=0.858$) und zeigt an, dass härtere Objekte leichter voneinander diskriminiert werden können als weiche (s. Abbildung 4-12). Die oben erwähnte Interaktion zwischen Nachgiebigkeit und Explorationsmethode zeigt erneut keine statistische Bedeutsamkeit ($F(1,18)=3.69$, $p=0.071$).

4-2-4-5 Einfluss auf die aufgewendete Kraft

Aufgewendete Kraft beim Drücken. Werden Objekte durch Ausüben von Druck exploriert, so lässt sich die mittlere aufgewandte Kraft bei Würfeln mit Textur (MW = 17 N, sd = 5 N) sowie bei Würfeln ohne Textur (MW = 18 N, sd = 4 N) deskriptiv kaum voneinander unterscheiden. In Abbildung 4-13 wird die Kraftaufwendung über die unterschiedlichen im Experiment verwendeten Würfelproben dargestellt: Es zeigt sich eine Tendenz zu geringerer Kraftaufwendung, wenn Proben mit Textur auf Nachgiebigkeit untersucht werden. Darüber hinaus kann eine Veränderung der Kraftaufwendung nicht beobachtet werden für Nachgiebigkeiten oberhalb bzw. unterhalb der angenommenen Grenze von 0.16 mm/N.

Eine ANOVA über den Messwiederholungsfaktor Reizprobe (Nachgiebigkeit, Oberflächentextur) zeigt weder einen signifikanten Einfluss der Nachgiebigkeit (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(52.1,16.7)=2.79$, $p=0.089$) noch der Oberflächentextur ($F(1,8)=2.25$, $p=0.172$). Da die Interaktion die Kraftaufwendung nicht beeinflusst (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.7,21.1)=0.75$, $p=0.516$), wird auf eine Nachanalyse der aufgewendeten Kräfte in Abhängigkeit der als „hart“ oder „weich“ definierten Objektproben (um 0.16 mm/N) verzichtet.

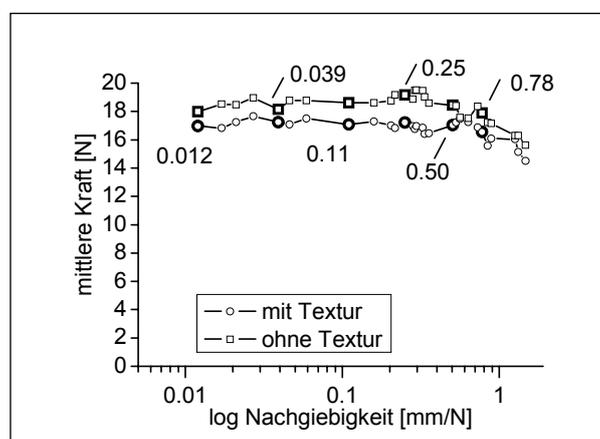


Abb. 4-13 Mittlere aufgewandte Kraft [N] beim Testen der Silikonwürfel mit bzw. ohne zusätzliche Oberflächentextur. Würfel mit Standardnachgiebigkeit sind mit ausgefüllten Zeichen dargestellt.

4-2-4-6 Diskussion der Ergebnisse

Mit abnehmender Nachgiebigkeit nehmen die Weber-Brüche zu. Weiche Objekte (Nachgiebigkeit > 0.16 mm/N) können voneinander unterschieden werden, wenn ihre Nachgiebigkeit um mindestens 25% voneinander abweicht. Dieses Ergebnis entspricht den Befunden der Literatur (s. Abschnitt 4-3-1). Variationen der Nachgiebigkeit des Würfels erklärten am besten die Variationen in der Sensitivität (d') bei der Wahrnehmung nachgiebiger Objekte: Harte Objekte konnten signifikant besser voneinander unterschieden werden als weiche. Die Kraftaufwendung unterschied sich nicht in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit.

Die Ergebnisse wurden in Tabelle 4-18 zusammengefasst.

Einfluss der Oberflächentextur. Zentrale Fragestellung dieses Abschnitts war der Einfluss zusätzlicher Oberflächentextur auf die Diskriminierungsfähigkeit (Hypothese III-1). Kein solcher Effekt konnte nachgewiesen werden: Weder die Sensitivität noch die Kraftaufwendung bei der Gruppe D wurde von der Art der Oberfläche beeinflusst. Auch eine Wechselwirkung

mit der Standardnachgiebigkeit war erwartet worden (Hypothese III-2), konnte jedoch nicht bestätigt werden.

Das Fehlen eines signifikanten Einflusses zusätzlicher Oberflächentextur auf die Diskriminierungsfähigkeit in dieser Studie lässt nicht vollständig darauf schließen, dass Struktur keinen Einfluss auf die Unterscheidungsfähigkeit hat: Die zusätzliche Oberflächentextur war nicht aus einer harten, vom Grundmaterial unabhängigen Struktur erzeugt worden, sondern wies vielmehr dieselbe Nachgiebigkeit wie das Objekt auf.

Tabelle 4-18 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock III „Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit – Einfluss von zusätzlicher Textur“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
III-1 Zusätzliche aufgabenirrelevante taktile Informationen führen zu einer reduzierten Sensitivität, außerdem zu einer allgemeinen höheren Kraftaufwendung (bei Ausüben von Druck)	n. bestätigt	
III-2 Der Einfluss zusätzlicher taktiler Informationen ist abhängig von der Standardnachgiebigkeit	n. bestätigt	

4-2-5 Zusammenfassende Diskussion

In Abschnitt 4-2-3 war kein beeinträchtigende Einfluss gegenüber der Normaltemperatur reduzierter oder erhöhter Fingertemperatur auf die Sensitivität nachgewiesen worden: Um einen Verlust der Sensitivität zu kompensieren, wandten die Probanden höhere Kräfte beim Explorieren der nachgiebigen Objekte durch Ausüben von Kraft auf. Zusätzlich zeigte sich als weiterer das Auflösungsvermögen beeinflussender Faktor die Explorationsmethode: Objekte konnten besser diskriminiert werden, wenn sie durch Ausüben von Druck untersucht wurden.

In Abschnitt 4-2-4 wurde der zusätzliche Einfluss einer Oberflächentextur auf die Diskriminierungsleistung adressiert: Variationen der Textur beeinflussten weder die Sensitivität noch die Kraftaufwendung. Weit größeren Einfluss hatte die Standardnachgiebigkeit: Harte Objekte konnten besser diskriminiert werden als weiche Objekte. Ein derartiges Ergebnis konnte in der ersten Untersuchung nicht nachgewiesen werden; zusätzlich fällt bei deskriptiver Betrachtung der Weber-Brüche ein Unterschied zwischen den Stichproben bezüglich sehr harter Standardnachgiebigkeiten auf: Während Probanden in Abschnitt 4-2-3 sehr gut extrem harte Objekte (0.018 mm/N) wahrnehmen konnten, zeigten die Probanden in Abschnitt 4-2-4 eine geringe Sensitivität für harte Objekte (0.012 mm/N).

Des Weiteren unterscheiden sich beide Studien bezüglich des Einflusses der Explorationsmethode, die zwar in Abschnitt 4-2-3 nicht jedoch in Abschnitt 4-2-4 die Sensitivität (d') beeinflusste.

Die Unterschiede zwischen den beiden Studien lassen sich größtenteils auf Stichprobeneffekte zurückführen: Ein direkter Vergleich der beiden Studien auf dieser Grundlage erscheint demzufolge wenig sinnvoll.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zusätzliche (nachgiebige) Oberflächenstruktur weder die Sensitivität beeinträchtigt, noch sich negativ auf das Aufbringen zusätzlicher Kräfte auswirkt. Wird die Fingertemperatur gegenüber der Normaltemperatur reduziert oder erhöht, so wenden die Probanden höhere Kräfte auf, um den Verlust an Sensitivität auszugleichen.

Es erscheint daher sinnvoll, Objekte unterschiedlicher Nachgiebigkeit durch Ausüben von Druck zu untersuchen, wenn höhere Sensitivität erwünscht ist, und die Fingertemperatur zu kontrollieren, wenn die Kräfte beim Explorieren gering gehalten werden sollen.

4-3 Wahrnehmung von Objektkanten

“A review of the literature has shown that perception and discrimination vary with stimulus orientation. The most characteristic finding in these studies is a preference for vertical and horizontal orientations over obliques. This preference manifests itself in the resolution of targets, estimation of stimulus position, learning and discrimination of objects, and a wide assortment of other perceptual phenomena. These preferences are found throughout the animal kingdom, from man to octopus.”

(Appelle, 1971, p. 274)

4-3-1 Theoretischer Hintergrund

Bei der haptischen Wahrnehmung von Objekten spielt neben den Materialeigenschaften des Objektes (Textur, Nachgiebigkeit) die Form eine wichtige Rolle (z.B. Klatzky & Lederman, 2003a). Die Form eines Objektes, d.h. seine äußere Gestalt, wird zu einem wesentlichen Teil von seinen Kanten bestimmt, d.h. in welchem Winkel zwei Teilflächen eines Objektes aneinander stoßen.

Um die Form eines Objektes haptisch zu explorieren, noch spezifischer seine Kontur, wird als adäquate Explorationsbewegung in der Regel das Abfahren der Kontur mit dem Finger gewählt (z.B. Lederman & Klatzky, 1987; vgl. auch Lakatos & Marks, 1998). Zur Wahrnehmung der Kontur trägt demzufolge neben der rein taktilen Information über die Oberflächenstruktur des Objektes und dem Kontakt mit dem Objekt v.a. das propriozeptive System Informationen über die Stellung des tastenden Fingers sowie über seine Bewegung bei (s. Abschnitt 2-6-1). Dass bei der Wahrnehmung des haptischen Raums Verzerrungen auftreten können, war bereits in Abschnitt 2-6-1 angesprochen worden. Ein besonderes Phänomen von Richtungsverzerrung im haptischen Raum ist der sog. Oblique-Effekt: Abweichungen von horizontaler oder vertikaler Orientierung eines Balkens können besser detektiert werden als von diagonal (oblique) dargebotenen Balken. Der Oblique-Effekt wurde anfangs besonders bei der visuellen Wahrnehmung von Balkenorientierung, aber auch bei Winkelgröße, untersucht (vgl. Appelle & Gravetter, 1985; Appelle, 1972), ehe ein vergleichbares Phänomen auch bei der haptischen Wahrnehmung identifiziert werden konnte.

Exkurs zum visuellen Oblique-Effekt. Auch bei der visuellen Wahrnehmung lässt sich der Oblique-Effekt sowohl für Linienorientierung (z.B. Chen & Levi, 1996; Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993; Orban, Vandebussche & Vogels, 1984; Weene & Held, 1966) als auch bei der Winkeldiskriminierung (z.B. Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993; Appelle, 1971) nachweisen. Das Ausmaß des Orientierungseinflusses auf die visuelle Wahrnehmung ist jedoch geringer bei der Winkeldiskriminierung (z.B. Chen & Levi, 1996; Heeley & Buchanan-Smith, 1993). Die Wahrnehmung von einem Winkel kann beschrieben werden über die Kombination von zwei unterschiedlich orientierten Winkelschenkeln, also Linien; tatsächlich konnte die Performanz bei der Diskriminierung von Winkelgröße vorhergesagt werden durch die Diskriminierungsleistung bei der Wahrnehmung von zwei unterschiedlich orientierten Linien (z.B. Chen & Levi, 1996; Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993).

Haptische Wahrnehmung von Balkenorientierung. Essock et al. (1997) konnten keinen Oblique-Effekt bei der Diskriminierung von Balkenorientierung finden. Stattdessen zeigten die Autoren eine Überlegenheit der Wahrnehmung vertikaler gegenüber horizontaler Balkenorientierung. Lechelt (1988) hingegen konnte den Oblique-Effekt nachweisen (s. auch Tabelle 4-19).

Haptische Wahrnehmung von Winkelgröße. Appelle (1971) untersuchte die haptische Diskriminierungsfähigkeit von Winkeln unterschiedlicher Winkelgröße, konnte jedoch die erwartete Abnahme der Genauigkeit spitzer oder stumpfer Winkel (d.h. Oblique-Effekt) nicht bestätigen. Auch die Positionierung des Winkels im Raum beeinflusst die Diskriminierungsleistung nicht (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006; Voisin, Benoit & Chapman, 2002a; Tressoldi, 1989). Das Fehlen kutaner Rückmeldung hingegen reduziert die Auflösungsgenauigkeit (DL) um das 1.7fache, während rein taktile (d.h. passive) Exploration den DL um das 2fache erhöht (vgl. Voisin et al., 2002b). Dabei ist wohl die wichtigste taktile Information v.a. die Winkelspitze: Das Fehlen der Winkelspitze reduziert den DL ca. um den Faktor 1.3 (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006). Zugleich verdoppelt sich der DL bei erzwungener Exploration entlang der Winkelkontur (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006).

Tabelle 4-19 Weber-Bruch sowie Wertebereich der Stimuli aus unterschiedlichen Studien zur Wahrnehmung von Balkenorientierung sowie von Winkelgröße.

	Weber-Brüche	Stimulusrange
	Balkenorientierung	
Essock et al. (1997)	n. a. ¹²	0°, 45°, 90°, 135°
Lechelt, Eliuk & Tanne (1976) ¹³ ; Lechelt & Verenka (1980) ²	0.17	0° (DL = 6°, 3°)
	0.05	45° 90°, 135°, 225°, 315°
	Winkelgröße	
Appelle (1971)	0.17; 0.12; 0.10	30°, 45°, 60°
	0.06	90°, 120°, 135°, 150°
Henriques & Soechting (2003)	0.05	90°
Voisin et al. (2002a)	0.05	90°
Wijntjes & Kappers (2006)	0.30	20°
	0.08	135°
Gentaz & Hatwell (1995, 1996, 1998, 1999) ²	0.17	0° (DL = 4°)
	0.05	45° 90°, 135°
Gentaz et al. (2001) ²	0.14, 0.17, 0.22	0° (DL = 4°)
	0.05	15°, 30°, 45° 105°, 120°, 135°
Luyat et al. (2001) ²	0.13	0° (DL = 2°)
	0.04	45° 90°, 135°

Tabelle 4-19 ist ein Überblick über die Studien zur haptischen Diskriminierungsfähigkeit von Winkelgrößen zu entnehmen. Unterschiede von ca. 7% können bei Winkelgrößen von 90-135° (vgl. Wijntjes & Kappers, 2006; Henriques & Soechting, 2003; Voisin et al., 2002a; Appelle, 1971) und 10-30% Abweichung bei Winkelgrößen kleiner als 60° detektiert werden (vgl. Wijntjes & Kappers, 2006; Appelle, 1971). Dabei zeigt sich eine Überlegenheit von Winkelgrößen von mindestens 90°, während insbesondere das Auflösungsvermögen spitzer

¹² Sensitivität wurde im Sinne der Signalentdeckungstheorie über d' angegeben.

¹³ Matching des haptisch explorierten Reizes entspricht der Herstellungsmethode (s. Abschnitt 3-1-2)

Winkel eingeschränkt ist. Dieses Phänomen (das in seiner Art von dem visuellen Oblique-Effekt abweicht) wird im Folgenden als haptischer Oblique-Effekt bezeichnet.

Ein ähnliches Ergebnis wird auch bei Matchingexperimenten bestätigt (z.B. Luyat et al., 2001; Gentaz et al., 2001; Gentaz & Hatwell, 1999, 1998, 1996, 1995; Lakatos & Marks, 1998; Lechelt & Verenka, 1980; Appelle & Gravetter, 1985; Lechelt, Eliuk & Tanne, 1976). Die aus den Matching-Daten gewonnenen Weber-Brüche variieren zwischen ca. 5% bei Winkelgrößen von 90-315° und ca. 13-23% bei Winkelgrößen von 45° (vgl. Tabelle 4-19).

Dieser Unterschied zwischen Ergebnissen aus Diskriminierungs- sowie Matchingexperimenten veranlasste Essock (1980), zwischen zwei Klassen von Oblique-Effekten zu unterscheiden: Während Effekte der Klasse 1 grundlegende sensorische Fähigkeiten, wie Auflösungs-genauigkeit bzw. Unterscheidungsfähigkeit, beeinflussen, verlangen Effekte der Klasse 2 das Einbeziehen kognitiver Prozesse (vgl. Essock et al., 1997; Essock, 1980; Appelle, 1972). Letztere erfordern das Identifizieren der haptisch wahrgenommen, räumlichen Eigenschaften des Objektes, ehe sie haptisch reproduziert werden können (vgl. Klatzky & Lederman, 2003b; Essock et al., 1997). Die bei der Einschätzung der Balkenorientierung (der Winkelgröße) durch Matching entstandenen Fehler unterscheiden sich nach Essock (1980) von den Ergebnissen aus Paarvergleichs-Aufgaben (Klasse 1-Effekten).

Offene Fragestellungen. Der haptische Oblique-Effekt konnte in Paarvergleich-Aufgaben (Effekte der Klasse 1) nicht immer nachgewiesen werden (z.B. Essock et al., 1997). Dennoch kann deskriptiv ein Trend beobachtet werden, der eine Abhängigkeit der Diskriminierungsleistung von der Winkelgröße oder Balkenorientierung zu bestätigen scheint: Ca. 5-7% Abweichungen können bei rechten Winkeln oder vertikal orientierten Balken detektiert werden, während größere Unterschiede bei spitzen Winkeln oder obliquen Balkenorientierungen erforderlich werden, um wahrgenommen werden zu können (s. oben).

Hypothese IV-1: Die Sensitivität ist abhängig vom Standardwinkel und besonders hoch bei Winkelgröße resp. Balkenorientierung von 90° und nimmt für spitze Winkel resp. oblique Balkenorientierung ab (haptischer Oblique-Effekt).

Eine unterschiedliche Sensitivität bzw. Diskriminierungsleistung war in Abhängigkeit des Stimulusmaterials bei der visuellen Wahrnehmung nachgewiesen worden (s. Chen & Levi, 1996; Heeley & Buchanan-Smith, 1993) und zeigt sich, zumindest deskriptiv, auch bei den oben berichteten Studien zur haptischen Wahrnehmung (s. Tabelle 4-19). Es wird daher erwartet, dass bei einem direkten Vergleich der beiden Stimuliarten auch ein Einfluss auf die Wahrnehmung beobachtbar sein sollte.

Hypothese IV-2: Die Sensitivität ist abhängig von der Reizart (Balkenorientierung, Winkelgröße).

Dieser Einfluss der Stimulusart resultierte (im Gegensatz zu Befunden aus der visuellen Wahrnehmung) bei haptischer Diskriminierung von Balkenorientierung gegenüber der Diskriminierung der Winkelgröße in einer sehr starken Reduktion des Oblique-Effekts (vgl. Essock et al., 1997). Besonders bei der Wahrnehmung von Winkelgröße sollte also der haptische Oblique-Effekt markant replizierbar sein.

Hypothese IV-3: Der haptische Oblique-Effekt ist abhängig von der Reizart und tritt markanter bei Winkeln unterschiedlicher Größe auf.

Wie schon in Abschnitt 2-6-1 erläutert, beeinflusst die Art der Exploration Größe bzw. Vorhandensein des haptischen Oblique-Effekts (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006; Gentaz &

Hatwell, 1998, 1996). Sensitivität der Diskriminierung von Winkeln ist außerdem abhängig von der Art der zurückgemeldeten Information: Alleinige propriozeptive sowie alleinige taktile Rückmeldung führten zu einer Reduktion der Sensitivität (z.B. Voisin et al., 2002b). Winkel- oder Orientierungsinformationen können auch durch haptische Ein-/Ausgabegeräte, beispielsweise über das Kraftinformation vermittelnde PHANTOM® (SensAble Technologies, Inc., USA), dargestellt werden (vgl. Abschnitt 7-2). Dabei hält der Proband einen Stift in der Hand, mit dem er z.B. die Schenkel eines Winkels entlang fahren kann und haptische Rückmeldung über den Kontakt mit dem Winkel erhält. Der Proband muss demzufolge über alleinige propriozeptive Informationen die Winkelgröße wahrnehmen. Es konnte bereits in Experimenten zur Wahrnehmung von Rauheit (z.B. Klatzky et al., 2003) und Nachgiebigkeit (z.B. La Motte, 2000) gezeigt werden, dass ein Stift Informationen über die Oberflächeneigenschaften vermitteln kann, dass sich die Wahrnehmung vermittelter Informationen jedoch von der durch realen Kontakt gewonnenen d.h. nicht vermittelter) Information unterscheiden kann. Bei der Exploration von Winkelgröße oder Balkenorientierung mittels eines Stiftes fehlen taktile Informationen, die wie oben bereits angedeutet, zu einer Reduktion der Sensitivität führen können

Hypothese IV-4: Die Sensitivität reduziert sich, wenn allein propriozeptive Rückmeldung über einen Taststift vermittelt wird.

4-3-2 Methode

Stimulusmaterial. Als Reizproben wurden verstellbare Winkel konstruiert und auf Winkeltische montiert, die eine Präsentation des Winkels in einem 75°-Winkel zum Tisch erlaubten (s. Abbildung 4-14). Die verstellbaren Winkel bestanden aus zwei hölzernen Winkelschenkeln von je 9 cm Länge sowie 1.5 cm Höhe und Breite und waren auf einer 15.5 x 10 cm Metallplatte so befestigt, dass ein Schenkel fixiert und einer beweglich war. Ein aus der Platte gefräster 230°-Kreis erlaubte das Einstellen des beweglichen Winkelschenkels mit einer Genauigkeit von 1° von sowohl oberhalb als auch unterhalb der Schwelle. Aufgrund der Beschränkung des Winkel-Einstellbereichs auf Winkel zwischen 0-180° konnten Winkel größer als 180° nicht dargeboten werden.

Als Standardwinkel wurden Winkelgrößen von 45°, 90°, 135° und 180° ausgewählt und dafür je ein Winkeltisch mit verstellbarem Winkel produziert; zusätzlich wurden zwei weitere angefertigt, über die die Vergleichswinkel präsentiert wurden, um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten. Die Vergleichsreize konnten von oberhalb kommend (obere Schwelle) oder von unterhalb kommend (untere Schwelle) an den Standardwinkel angenähert werden; einzige Ausnahme bildete der 180°-Winkel, für den lediglich die untere Schwelle ermittelt werden konnte.

Versuchsaufbau. Das Stimulusmaterial wurde, um die Beteiligung der Gravitationskräfte nicht auszuschließen (s. Abschnitt 2-6-1) nicht in der horizontalen Ebene, sondern in einem Winkel von 75° zum Tisch präsentiert. Um Störungen durch Geräusche zu reduzieren, trugen die Probanden während der gesamten Testung geschlossene Kopfhörer, über die ihnen 1/f-Rauschen (sog. Rosa Rauschen) sowie Tonsignale, die die Reizpräsentation ankündigten, dargeboten wurde. Visuelle Reize wurden durch das Tragen einer Schlafmaske minimiert (s. Abbildung 4-15).

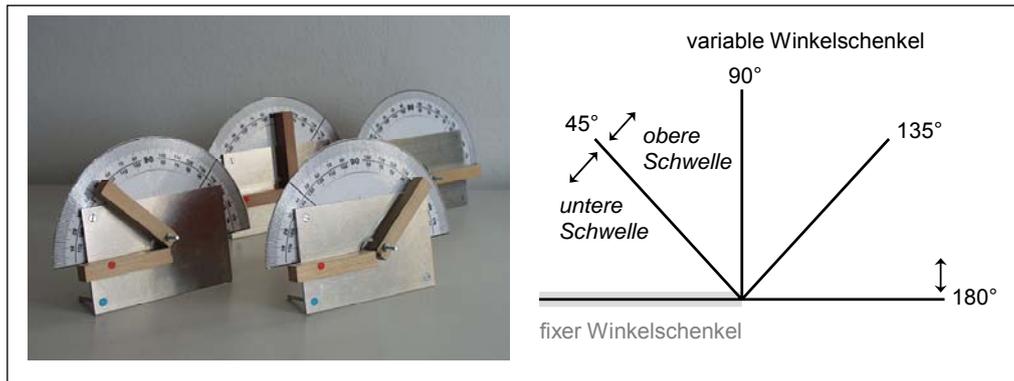


Abb. 4-14 Die vier Standardreize: Links im Bild das tatsächliche Stimulusmaterial; die Markierung auf dem Winkelschenkel kennzeichnet den Punkt, von dem die Exploration bei der Winkeldiskriminierungsaufgabe begonnen wurde. Rechts im Bild eine schematische Darstellung des verwendeten Reizmaterials.

Versuchsdesign. Um den Einfluss von *Explorationsmethode* (mit Taststift, mit Finger), *Reizgröße* (45° , 90° , 135° , 180°) sowie *Reizart* (Winkel, Balken) auf die Sensitivität zu erheben, wurden, wie oben beschrieben, für die vier Standardreize Winkeltische produziert. Die Stimulusart (Winkelgröße vs. Balkenorientierung) wurde über Instruktion manipuliert: Während bei der Wahrnehmung von Winkeln die Untersuchung des Winkels am fixen Winkelschenkel begann und sich über die gesamte Winkelinnenkante erstreckte, wurde bei der Wahrnehmung von Balken am Schnittpunkt beider Winkelschenkel begonnen. Reizart und Winkelgröße wurden als Innersubjektfaktoren ausgewählt. Explorationsmethode wurde als Zwischengruppenfaktor umgesetzt: Der einen Probandengruppe das Explorieren der Winkel oder Balken mittels des ausgestreckten Zeigefingers oder mit einem Taststift erlaubt. Um die Testbedingungen zwischen den beiden Explorationsarten konstant zu halten, wurden die Probanden (Gruppe Zeigefinger) instruiert, nur mit Bewegungen des Ellbogens und des Schultergelenks die Winkelschenkel entlang zu fahren. Um ein Abbiegen des Handgelenks zu verhindern, trugen die Probanden medizinische Handgelenkschoner (s. Abbildung 4-15). Da für drei der Standardwinkel (45° , 90° , 135°) sowohl die obere als auch die untere Schwelle, für 180° nur die obere Schwelle bestimmt werden sollte, wurde die Testung der Personen auf zwei Testtage ausgedehnt. Damit, wie außerdem über zusätzliche Pausen nach jeder Schwellenbestimmung, wurde eine Ermüdung der Muskulatur wie auch eine Reduktion der Aufmerksamkeit verhindert.



Abb. 4-15 Position des Probanden beim Explorieren der Stimuli

Experimenteller Ablauf. Die Probanden nahmen an einem Tisch so Platz, dass der Standard- oder Vergleichswinkel auf ihre Körpermitte ausgerichtet war und für sie mit ausge-

strecktem Zeigefinger der dominanten Hand (vgl. Lakatos & Marks, 1998) oder mit einem Taststift von 15 cm Länge als verlängerter Unterarm erreichbar war. Während der gesamten Testung wurde der Arm nicht fixiert (vgl. Gentaz & Hatwell, 1998, 1996).

Nach einer kurzen Trainingsphase, begann der Hauptversuch. Den Probanden wurden zwei Reize nacheinander dargeboten. Die Präsentationsdauer für den Winkelschenkel betrug 3 Sekunden, die der Balkenorientierung 1.5 Sekunden. Während des Interstimulusintervalls (Dauer: 2 Sekunden) konnten die Probanden ihren Arm ablegen (vgl. McCloskey, 1978). Beginn und Ende der Exploration wurde über Tonsignale angekündigt.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Der DL wurde über das adaptive PEST und Staircase-Verfahren getrennt für die obere und untere Schwelle erhoben (s. Abschnitt 3-1-2-2). Jede Schwelle wurde je zweimal in ab- und aufsteigender Sequenz angehört. In Anlehnung an die Literatur (s. Abschnitt 4-3-1) wurde als Startreiz einer absteigenden Reihe 20° oberhalb resp. unterhalb des Standardreizes ausgewählt; die Schrittgröße betrug 5°, bis ein Vergleichsreiz von 10° größer bzw. kleiner als der Standardreiz erreicht wurde, und wurde danach auf 2° reduziert. Entweder nach der ersten Ungleich-Antwort oder, wenn 5° größer bzw. kleiner als der Standardreiz erreicht wurde, wurde die Schrittgröße halbiert. Nach dem dritten Umkehrpunkt endete die Reihe. Bei einer aufsteigenden Reihe wurde mit einem Gleich-Paar begonnen; die Schrittgröße für die folgenden Reizpaare betrug 5° (Stift) und 3° (Finger); nach der ersten Ungleich-Antwort wurde sie auf 2° reduziert, nach einer weiteren Ja-Antwort auf 1°. Wie bei der absteigenden Sequenz endete die Schwellenerhebung der aufsteigenden Reihe mit dem dritten Umkehrpunkt.

Aufgabe des Probanden war es stets, zwei Reize miteinander zu vergleichen und anzugeben, ob sich der zweite Reiz größer, kleiner oder gleich dem ersten Reiz angefühlt hatte. Gleich-Antworten sowie falsche Richtungsantworten wurden als „kein Unterschied wahrgenommen“ gewertet und führten zu einer Erhöhung des Vergleichsreizes; eine richtige Richtungsantwort hingegen resultierte in einer weiteren Reduktion des Vergleichsreizes (vgl. Kaernbach, 2001). Die Unterschiedsschwelle (DL) wurde definiert als Mittelwert der Umkehrpunkte der oberen bzw. unteren Schwelle innerhalb einer Sequenz (s. Abschnitt 3-1-1) und damit dem Wert, der in 50% der Fälle detektiert werden kann.

Jede Sequenz wurde zweimal wiederholt. Reihenfolge der Sequenzen in Abhängigkeit der Standardreize sowie des Sequenztyps (auf-, absteigend) wurde randomisiert. Desgleichen wurde die Position des Standardwerts innerhalb eines Trials zufällig variiert.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die Unterschiedsschwellen (DL) der einzelnen Sequenzen gemittelt und am Standardreiz relativiert; die Weber-Brüche werden in Abschnitt 4-3-3-2 deskriptiv dargestellt.

In einem zweiten Schritt wurde der Index der Detektabilität (s. Abschnitt 3-2-2) in Abhängigkeit des Schwellentyps sowie der Reizbedingungen ermittelt. Da sich für die Standardreize 45°, 90° und 135° der Schwellentyp (obere, untere Schwelle) nicht signifikant voneinander unterschied ($F(1,18)=0.25$, $p=0.622$), wurde eine schwellentypunabhängige Variable berechnet. Die Fragestellungen wurden über eine ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren *Standardwinkel* und *Stimulusmaterial* und dem Gruppenfaktor *Explorationsmethode* geprüft. Verletzungen der angenommenen Sphärizität werden mit der Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert; das Signifikanzniveau wird auf 5% festgelegt. Alle F-Statistiken der ANOVA werden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Einzeleffekte werden über Post-hoc Tests auf Signifikanz getestet.

4-3-3 Experimentalblock IV – Auflösungsvermögen von Objektkanten

4-3-3-1 Stichprobe

Am Experimentalblock IV „Auflösungsvermögen von Objektkanten“ nahmen 25 Mitarbeiter und Studenten der Universität der Bundeswehr München teil. Fünf Personen (3 Männer, 2 Frauen) mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, da für zwei die Bestimmung der Schwellwerte unmöglich war und die restlichen drei an nur einem Testtermin teilnehmen konnten.

Von den insgesamt 20 verbleibenden Probanden explorierten 10 das Stimulusmaterial mit dem Zeigefinger (6 Männer, 4 Frauen) und die anderen 10 mit dem Taststift (7 Männer, 3 Frauen). Im Mittel waren die Probanden in beiden Explorationsgruppen 30 Jahre alt. Fast alle Testpersonen waren Rechtshänder, nur zwei Personen, die die Reize mit dem Zeigefinger untersuchten, waren Linkshänder.

4-3-3-2 Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche

In Tabelle 4-21 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Weber-Brüche zusammengestellt. Die Weber-Brüche für die Unterscheidung von Winkelgrößen von mindestens 90° liegen relativ unabhängig des Stimulusmaterials (Balken, Winkel) bei ca. 7%, während ein von einem 45°-Winkel unterscheidbarer Winkel (bzw. ein um 45° geneigte Balken) mehr als doppelt so groß sein muss, um diskriminiert werden zu können.

Tabelle 4-21 Weber-Brüche in Abhängigkeit des verwendeten Stimulusmaterials (Balken, Winkel) sowie der Winkelgröße getrennt für beide Explorationsarten (Zeigefinger, Stift).

		Balken		Winkel	
		MW	sd	MW	sd
Zeigefinger	45°	0.19	0.07	0.20	0.07
	90°	0.09	0.03	0.08	0.02
	135°	0.05	0.02	0.06	0.02
	180°	0.04	0.01	0.06	0.02
Taststift	45°	0.25	0.10	0.29	0.12
	90°	0.13	0.04	0.12	0.04
	135°	0.07	0.02	0.07	0.03
	180°	0.06	0.02	0.07	0.03

In Abbildung 4-16 sind die Weber-Brüche graphisch dargestellt. Die Explorationsmethode scheint einen, wenn auch geringen Einfluss zu haben: Besonders Standardwinkelgrößen von 45° können mit einem Taststift schlechter wahrgenommen werden.

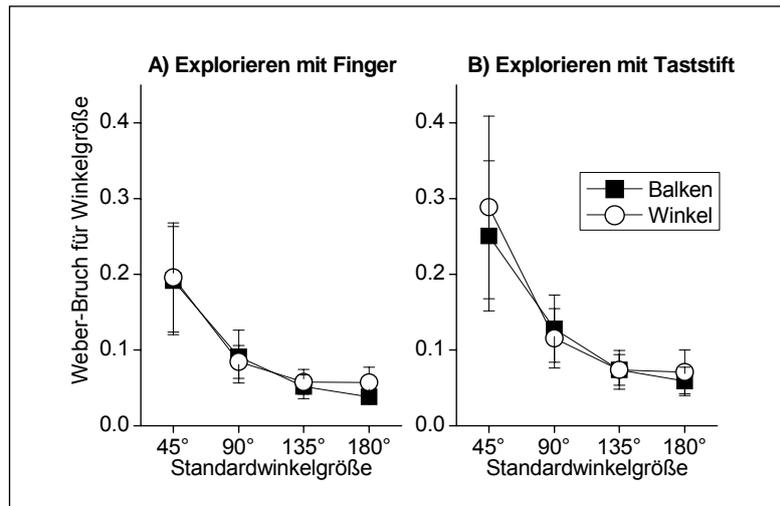


Abb. 4-16 Weber-Brüche für Winkelgröße in Abhängigkeit des Stimulusmaterials (Balken, Winkel) und der Standardwinkelgröße. Exploriert wurde durch Abfahren der Kontur mit A) Zeigefinger und B) einem Stift.

4-3-3-3 Einfluss von Stimulusart und Explorationsmethode

In Abbildung 4-17 ist die Sensitivität für die Wahrnehmung der Winkelgröße für beide Explorationsarten und Stimulusmaterial abgetragen. Werden Winkel oder Balken mit dem Finger exploriert, ist die Sensitivität (d') bei 180°-Winkeln besonders hoch und besonders niedrig bei 135°-Winkeln. Bei Exploration der Winkelgröße mit einem Stift deutet sich ein vom Stimulusmaterial abhängiger Einfluss der Winkelgröße an.

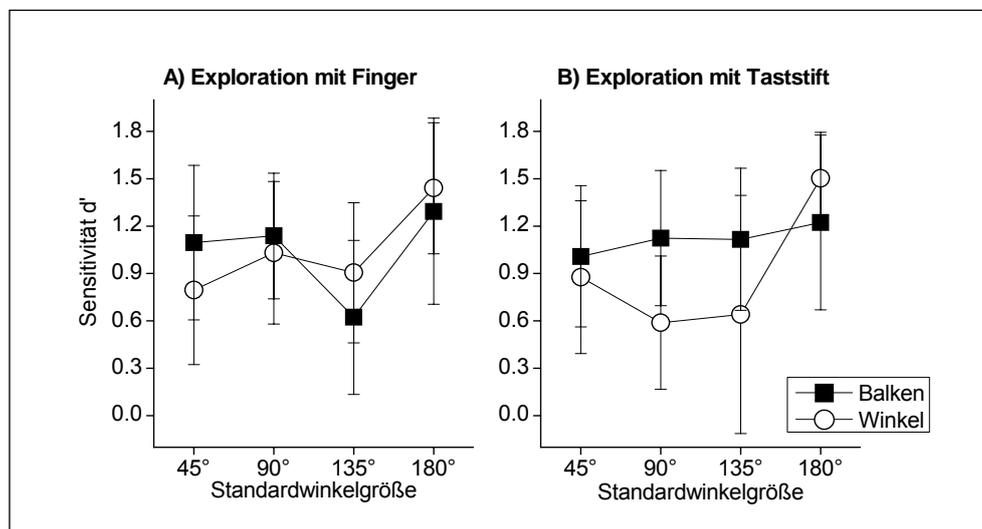


Abb.4-17 Sensitivität (d') für die Wahrnehmung von Standardwinkelgrößen, die als Balkenorientierung oder Winkel mit Finger (A) oder Stift (B) exploriert wurden.

In Tabelle 4-22 sind die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA abgetragen. Am meisten Varianz wird durch Variationen der Winkelgröße erklärt. Bonferroni-post-hoc Tests zeigen signifikante Unterschiede zwischen Stimuli mit einer Winkelgröße von 180° und allen anderen Winkelgrößen (p -Werte < 0.01): 180°-Winkel werden signifikant besser diskriminiert als jeder andere Winkel.

Ebenfalls signifikant wird die Interaktion zwischen Winkelgröße und Stimulusmaterial: Das Auflösungsvermögen ist besonders hoch bei 180°-Winkeln und noch besser, wenn Winkel und nicht Balkenorientierungen exploriert werden, während bei den anderen Winkelgrößen die Sensitivität für Balkenorientierung höher war. Gleichfalls statistisch signifikant (wenngleich ebenfalls effektschwach) wird auch die 3fache Wechselwirkung: Wie in Abbildung 4-17 deutlich wird, lässt sich diese Interaktion auf eine unterschiedliche Sensitivität für Balkenorientierungen in Abhängigkeit der Explorationsmethode zurückführen. Beide Interaktionen sind jedoch als effektschwach zu bezeichnen und daher zu vernachlässigen.

Tabelle 4-22 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA. Alle mit (*) gekennzeichneten Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	F (df)	p	η^2
Winkelgröße	8.34 (3,54)	< 0.05	0.317
Stimulustyp x Winkelgröße	3.44 (2.0,36.2)*	< 0.05	0.160
Stimulustyp x Winkelgröße x Gruppe	3.27 (3,54)	< 0.05	0.154
Stimulustyp x Gruppe	1.68 (1,18)	0.211	0.085
Stimulustyp	1.52 (1,18)	0.233	0.078
Winkelgröße x Gruppe	0.77 (3,54)	0.518	0.041
Gruppe	0.11 (1,16)	0.740	0.006

4-3-4 Diskussion

Die Ergebnisse zur Diskriminierung von Winkelgröße mit dem Finger entsprechen den Befunden der Literatur (vgl. Abschnitt 4-2-1-2): Ca. 5-7% Unterschiede in Winkelgröße oder Balkenorientierung waren nötig, um Winkelgrößen von mindestens 90° unterscheiden zu können, während für Winkelgrößen von 45° der zur Diskriminierung erforderliche Unterschied auf ca. 10-30% anwuchs.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-23 zusammengefasst.

Einfluss der Winkelgröße. Wie erwartet (Hypothese IV-1), zeigte sich eine Abhängigkeit der Diskriminierungsleistung (d') in Abhängigkeit der Winkelgröße. Dieser Effekt ließ sich v.a. auf ein erhöhtes Auflösungsvermögen von Winkeln um 180° zurückführen. Obwohl der Oblique-Effekt erwartet worden war, konnte er in Bezug auf den Entdeckbarkeitsindex d' nicht bestätigt werden, jedoch, wie in der Literatur beschrieben, bezüglich der Weber-Brüche (s. auch Essock et al., 1997). Ein weiterer Grund für die Überlegenheit des Auflösungsvermögens von stumpfen Winkeln kann auch auf einen Einfluss richtungsabhängiger Bewegung auf die Wahrnehmung im haptischen Raum zurückgeführt werden (s. Kwon et al., 2004).

Einfluss des Stimulusmaterials. Sowohl ein differentieller (in Abhängigkeit der Winkelgröße; s. Hypothese IV-2) als auch ein allgemeiner (s. Hypothese IV-3) Einfluss der Reizart war erwartet worden. Die Wechselwirkung, nicht der Haupteffekt, erreichte zwar statistische Signifikanz, der Effekt ist jedoch aufgrund seiner geringen Effektstärke zu vernachlässigen (s. auch Tabelle 4-23).

Einfluss der Explorationsmethode. Die Sensitivität (d') bei der Diskriminierung von Winkelgrößen wurde nicht von der Explorationsmethode beeinflusst. Dies bedeutet, dass rein propriozeptive Informationen ausreichen, um Winkelgrößen zu diskriminieren.

Tabelle 4-23 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock III „Wahrnehmung von Objektkanten“.

Hypothesen		Ergebnis	Stärke des Effekts
IV-1	Die Sensitivität ist abhängig vom Standardwinkel	bestätigt	$\eta^2=0.32$
IV-2	Die Sensitivität ist abhängig von der Reizart (Balken, Winkel)	teilweise bestätigt	s. Hypothese IV-3
IV-3	Der (haptische) Oblique-Effekt ist abhängig von der Reizart und tritt markanter bei Winkeln unterschiedlicher Größe auf	bestätigt	$\eta^2=0.16$ vernachlässigbar
IV-4	Die Sensitivität reduziert sich, wenn allein propriozeptive Rückmeldung über einen Taststift vermittelt wird	n. bestätigt	

Objektkanten oder geneigte Balken können besonders gut diskriminiert werden, wenn sie horizontal dargeboten werden. Die Sensitivität bei der Wahrnehmung von Objektkanten ist dabei unabhängig von zusätzlicher taktiler Information: Dies wiederum bedeutet, dass Objektkanten über ein haptisches Ein-/Ausgabegerät, welches Kraftinformationen rückmeldet, wie z.B. das PHANTOM® (SensAble Technologies, Inc., USA), adäquat wahrgenommen werden dürften (s. Abschnitt 7-2).

4-4 Zusammenfassung

In den in Kapitel 4 dargestellten Experimenten wurde als erste Grundlage für die Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle das haptische Auflösungsvermögen für die zwei wichtigsten Objektmerkmaleigenschaften – Textur und Härte (s. Abschnitt 4-1 und 4-2) – sowie die geometrische Eigenschaft Objektkante untersucht. Es war angenommen worden, dass das Auflösungsvermögen (Weber-Brüche) nicht über den gesamten Bereich ausgewählter Standardreize konstant ist. Die Ergebnisse (zusammengestellt in Tabelle 4-24) bestätigen diese Hypothese und werden im Folgenden in ihrer Bedeutung nochmals kurz skizziert.

Textur. Das Auflösungsvermögen von Texturen zeigte sich abhängig vom Darstellungsbe- reich: Makrotexturen können sowohl über räumliche Oberflächenmerkmale als auch bei zu- sätzlicher vibrotaktile Information ohne Verbesserung in ihrem Auflösungsvermögen wahr- genommen werden. Die Sensitivität im Mikrotexturbereich ist abhängig von der erzeugten vibrotaktile Frequenz bei lateraler Bewegung über die Oberfläche einerseits und anderer- seits bedeutend höher, wenn nicht durch Ausüben von Druck untersucht wird. Auf eine hohe Darstellungsgenauigkeit im niederfrequenten Bereich sowie bei Frequenzen um 250-300 Hz sowie ca. 500-700 Hz ist zu achten.

Nachgiebigkeit. Für die Objektnachgiebigkeit ließ sich kein Einfluss der Standardreizgröße auf die Sensitivität (Index der Entdeckbarkeit) nachweisen. Die Weber-Brüche unterschieden sich jedoch in ihrer Größe: Bei harten Objekten (< 0.16 mm/N) sind größere Unterschiede bezüglich der Nachgiebigkeit vonnöten, um voneinander unterschieden werden zu können.

Winkelgröße. Bei der Diskriminierung von Objektkanten konnte zudem der in der Forschung bereits formulierte Einfluss der Standardwinkelgröße auf die Auflösungsgenauigkeit des Menschen bestätigt werden (Oblique-Effekt): Die Unterscheidungsfähigkeit von Winkelgrö- ßen war demzufolge am geringsten für spitze Winkel bzw. oblique Balkenorientierungen.

Tabelle 4-24 Menschliches (haptisches) Auflösungsvermögen von Objekteigenschaften in Abhängigkeit der Referenzreize.

Textur	Härte	Kanten
Makrotextur (räumliche Periode > 0.8 mm): – JND-% = 0.15	Harte Objekte (< 0.16 mm/N): – JND-% = 0.50	Kanten $< 90^\circ$ – JND-% = 0.20
Mikrotextur (räumliche Periode < 0.8 mm) bei lateraler Bewegung höhere Sensitivität: – JND-% = 0.15 (0.11 mm) – JND-% > 0.35 (< 0.11 mm, 0.27 mm)	Weiche Objekte (> 0.16 mm/N): – JND-% = 0.30	Kanten $> 90^\circ$ – JND-% = 0.05

Fingertemperatur. Da auch thermische Reize Mechanorezeptoren beeinflussen können, war ergänzend der Einfluss von der Normaltemperatur abweichender Handtemperaturen auf das Auflösungsvermögen von Materialeigenschaften (Textur, Härte) untersucht worden. Denn gerade die in Abhängigkeit der Fingertemperatur verminderte Sensitivität ist für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion umso relevanter, wenn eine hohe Auflösungs- genauigkeit oder eine Berücksichtigung der beim Explorieren aufgewandten Kräfte erforder- lich wird. Die genauen Ergebnisse für die Wahrnehmung von Textur und Härte bei veränderte Fingertemperatur können Abbildung 4-18 entnommen werden, hier sei nur das Wichtigste wiederholt: Besonders im Bereich der Mikrotexturen konnte ein Einfluss auf die Wahrneh- mung bei veränderter Fingertemperatur nachgewiesen werden, beim Explorieren von Härte kompensierten die Probanden die verminderte Sensitivität v.a. durch erhöhte Kraftaufwen- dung (s. Abbildung 4-18).

Explorationsmethoden. Von ähnlich wichtiger Bedeutung für die möglichst „wirklichkeitsgetreue“ Gestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Berücksichtigung der Explorationsmethoden, die dem explorierenden Benutzer – nach Lederman & Klatzky (1987) – Informationen über haptische Objektmerkmale, Material- und geometrische Eigenschaften liefern (s. Abschnitt 2-3). Daher wurden verschiedene Explorationsmethoden untersucht die die Wahrnehmung bzw. die Genauigkeit der Auflösung haptischer Merkmale beeinflussen (s. Abbildung 4-18).

Wie erwartet, zeigte sich dabei, dass bei der Exploration von Objektnachgiebigkeit die Explorationsprozeduren bevorzugt werden, die Menschen sonst einsetzen, um ein Objekt haptisch zu identifizieren, nämlich das Ausüben von Druck (vgl. Klatzky & Lederman, 2003a; Lederman & Klatzky, 1987).

Auch zeigt sich eine verbesserte Diskriminierungsleistung bei der Texturwahrnehmung, wenn Mikrostrukturen durch Streichen über die Oberfläche untersucht werden, da zusätzlich zu den strukturellen Informationen noch vibrotaktile Informationen hinzukommen.

Bei der Wahrnehmung von geometrischen Eigenschaften, wie den Objektkanten, werden nach Lederman & Klatzky (1987) Informationen über die Form resp. Position der Kanten zueinander durch Entlangfahren der Kontur gewonnen (s. auch Abschnitt 2-6). Zusätzliche taktile Informationen erhöhen die Sensitivität dabei nicht. So konnten Winkel gleichermaßen gut mit einem Taststift oder dem eigenen Finger untersucht werden, so dass konsequenterweise in zweiter Instanz gilt: Winkel oder Objektkanten können vom Menschen problemlos über ein PHANTOM® Ein-/Ausgabegerät (SensAble Technologies, Inc., USA) wahrgenommen werden, ohne dass die Sensitivität reduziert ist.

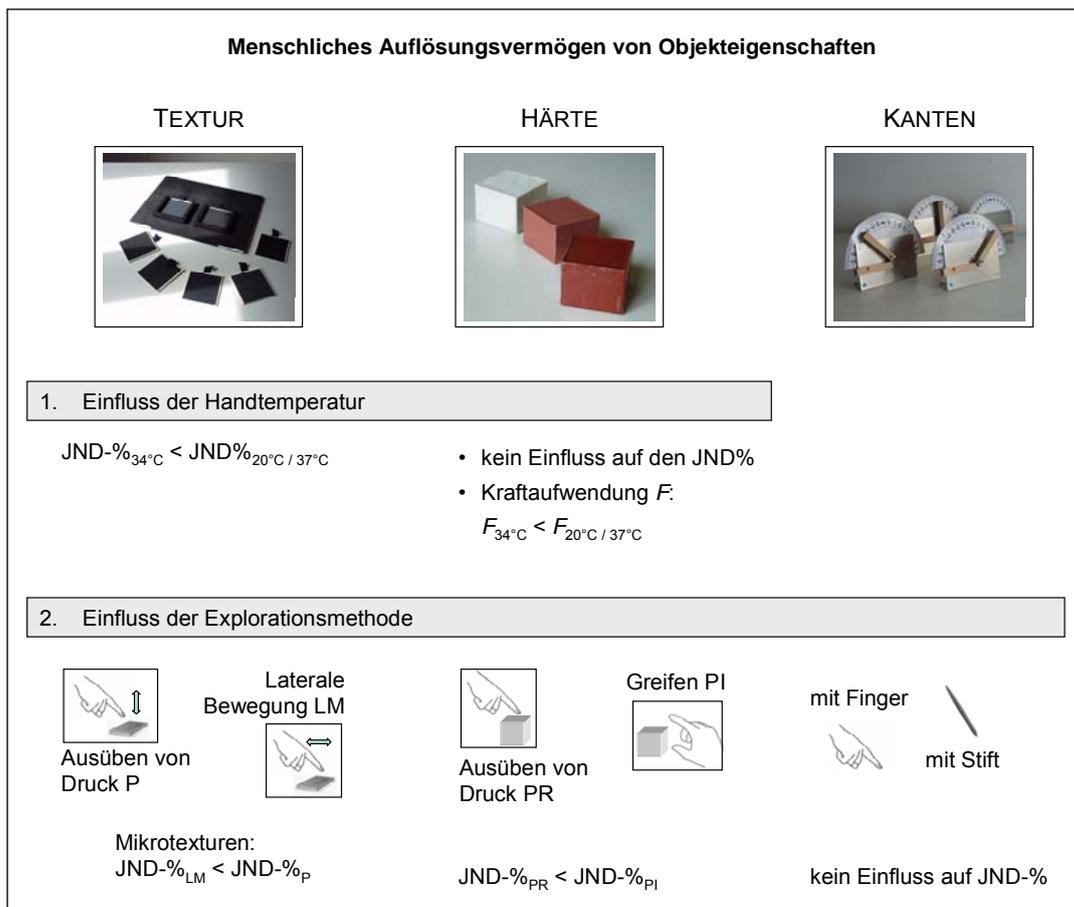


Abb. 4-18 Einfluss von Handtemperatur sowie Explorationsmethode auf das menschliche (haptische) Auflösungsvermögen von Objekteigenschaften.

Texturinformation. Zuletzt interessierte noch, inwiefern zusätzliche Texturinformationen das Auflösungsvermögen von Objekthärte beeinflussen, ob also durch die Zugabe von zur Diskriminierung irrelevanter Texturinformationen Härte schlechter wahrgenommen werden kann. Dabei ergab sich aus den Untersuchungen, dass das Auflösungsvermögen bei zusätzlich dargebotener Oberflächenstruktur nicht beeinträchtigt wird, so dass zusätzliche Informationen zur Oberflächentextur hier also keineswegs zu einem Sensitivitätsverlust bei der Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit führen.

Dieses Ergebnis ist im Zusammenhang mit dem folgenden Abschnitt (5-1) von entscheidender Bedeutung. Hier soll nun untersucht werden, ob die Darbietung von mehr als einer Materialeigenschaft die subjektive Einschätzung der Ausprägungsstärke der Materialeigenschaften grundsätzlich beeinflusst, oder nicht.

5 TEIL II INTRAHAPTISCHE INTERAKTION – DARBIETUNG ZUSÄTZLICHER INFORMATION

Im ersten Teil der Arbeit standen v.a. bottom-up-Prozesse bei der Verarbeitung physikalischer Reize (Material- und Geometrieigenschaften von Objekten) im Vordergrund sowie die Fähigkeit des Menschen, Unterschiede innerhalb einer Reizdimension – wie Textur, Nachgiebigkeit und Objektkanten – aufzulösen. Im Folgenden geht es nun um die gegenseitige Beeinflussung mehrerer physikalischer Parameter und deren Auswirkung auf die menschliche Wahrnehmung. Dadurch kann an Beispielen geklärt werden, inwiefern eine Erhöhung der haptischen Informationsmenge die Gestaltung von TPTA-Systemen bereichern kann.

Wahrnehmung ist auch konstruktiv: So medieren kognitive Prozesse die Kombination von Reizelementen dadurch, dass sie die einzelnen Reizelemente beispielsweise mit bereits bekannter Information (Einfluss der Erfahrung) abgleichen oder mithilfe von ebenfalls herangezogenen Kontextinformationen interpretieren. Indem die Aufmerksamkeit auf bestimmte Reizkombinationen gelenkt wird, können diese aus der Menge der in der Umwelt existierenden Informationen ausgewählt und weiterverarbeitet werden. Anfänglich nicht beachtete Informationen können dabei die Verarbeitung beeinflussen und zu illusionärer Wahrnehmung führen. Einige Beispiele für Illusionen wurden bereits vorgestellt.

Im Gegensatz zum visuellen System, dessen *field of view* sehr breit ist und selbst bei Aufmerksamkeitsfokussierung eine Beeinflussung durch Reize von außerhalb zulässt, ist die Wahrnehmung innerhalb des haptischen Systems auf einen direkten Kontakt mit dem Objekt beschränkt. Als Beispiel seien noch einmal die Explorationsbewegungen aufgeführt (vgl. Klatzky & Lederman, 2003a; Hsiao & Vega-Bermudez, 2002). Der kleinste Fokus der Aufmerksamkeit innerhalb des haptischen Systems stellt dabei grundsätzlich die das Objekt abführende resp. tastende Fingerspitze dar (z.B. Hsiao & Vega-Bermudez, 2002; Loomis, Klatzky & Lederman, 1991). In Abschnitt 5-1 wird daher der Frage nachgegangen, wie Informationen über eine Fingerspitze integriert werden, ob intrahaptische Illusionen auftreten und welche Rolle die Aufmerksamkeit sowie unterschiedliche Explorationsbewegungen bei der Wahrnehmung spielen (s. Abschnitt 5-1).

Diese Fragestellungen sind besonders beim Design multimodaler taktiler Ein-/ Ausgabegeräte relevant, die neben taktiler (oft vibrotaktiler) Information auch thermische Rückmeldung sowie Kraftfeedback geben (vgl. z.B. Kheddar, Drif, Citérin & Le Mercier, 2004; Kron & Schmidt, 2003; Ottensmeyer & Salisbury, 1997; Caldwell & Gosney, 1993).

Während in Abschnitt 5-1 das Zusammenwirken der in Kapitel 4 getrennt untersuchten Materialeigenschaften Textur und Härte untersucht wird, konzentriert sich Abschnitt 5-2 auf eine Geometrieigenschaft: Die Neigung einer Ebene relativ zur Horizontalen. In Abschnitt 4-3 wurde bereits darauf eingegangen, wie Objektkanten diskriminiert werden, wenn der Proband mit dem Finger an ihnen entlangfährt. Informationen über die Neigung einer Ebene können jedoch auch über mehrere Finger einer Hand aufgenommen werden: So kann die Form eines Objektes auch über die Stellung der einzelnen Finger zueinander wahrgenommen werden (z.B. Pont et al., 1999). Gerade bei der haptischen Wahrnehmung geometrischer Formen werden Positions- und Kraftinformationen kombiniert (vgl. Robles-De-La-Torre & Hayward, 2001) und so zu einer einheitlichen Wahrnehmung konstruktiv kombiniert.

Kapitel 5-2 befasst sich demzufolge mit einer Übertragung des eben untersuchten in Bezug auf ein haptisches Interface und prüft, ob abstrakte, vermittelte Informationen die Wahrnehmung von Form überhaupt erlauben und welche Zusatzinformationen die Wahrnehmung dabei speziell beeinflussen.

5-1 Informationsintegration an einem Finger

„Our research has demonstrated that haptic explorers can be remarkably fast and accurate at recognizing real objects. [...] We argue that these tasks are performed so well in part because haptics can encode many different object properties. Why then is haptics usually not regarded as viable perceptual system?“

(Klatzky, Lederman & Reed, 1987, p. 357)

5-1-1 Theoretischer Hintergrund

Menschen nehmen Textur und Härte als prominenteste Charakteristik von Objekten wahr (vgl. Klatzky & Lederman, 2003; Hollins et al., 2000; Hollins, et al., 1993). Darüber hinaus spielt jedoch bei der Identifizierung von Objekten, u.a. auch ihre thermische Eigenschaft eine wichtige Rolle. Diese scheint eng verknüpft mit der Wahrnehmung von Textur und Härte zu sein (vgl. Hollins et al., 1993; Hollins et al., 2000; Hollins et al., 1993; Lederman & Klatzky, 1990; Klatzky, Lederman & Metzger, 1985).

Unterschiedliche Informationen können bei Kontakt mit einem Objekt durch die Mechanorezeptoren dekodiert werden (s. Abschnitt 2-1-1); dabei können auch nicht adäquate Reize, wie z.B. thermische, die Mechanorezeptoren in ihrer allgemeinen Reaktivität beeinflussen (s. Abschnitt 2-1-1-3) und damit das Auflösungsvermögen der Finger beeinträchtigen.

Ein Einfluss thermischer Adaptation konnte jedoch nicht nur auf das Auflösungsvermögen (vgl. Abschnitt 4-1 und 4-2) nachgewiesen werden: Die Empfindungsstärke mechanischer Stimulation reduziert sich bei Kühlung (z.B. Phillips & Matthews, 1993; Stevens & Hooper, 1982; Green, Lederman, & Stevens, 1979) bzw. erhöht sich abhängig vom Standardreiz – v.a. bei glatten Oberflächen – bei Erwärmung (Green et al., 1979). Darüber hinaus finden sich weitere Beispiele in der Literatur. Dort wird eine gegenseitige Beeinflussung thermischer und mechanischer Stimulation, wie auch mechanischer Reize untereinander auf die Empfindung berichtet. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Thermische und mechanische Reize. Einfluss von Temperatur auf die Wahrnehmung kann mehrgestalt erfolgen: Durch Veränderung der Fingertemperatur wird die Detektierbarkeit von Reizen beeinflusst (wie bereits in Abschnitt 2-1-1-3 zusammengefasst und in Abschnitt 4-1 gezeigt). Auf der anderen Seite wird jedoch auch eine erhöhte thermische Empfindungsstärke bei Kontakt mit dem Objekt (oder der temperierten Fläche) gezeigt. Da die räumliche Auflösungsgenauigkeit thermischer Reize eher gering ist, tritt in Abhängigkeit der kontaktierten Fläche räumliche Summierung auf, was eine Erhöhung der wahrgenommenen Stärke der Temperatur zur Folge hat (vgl. dazu Abschnitt 2-5).

Darüber hinaus kann sich die Qualität thermischer Empfindung bei Kontakt mit der temperierten Fläche auf eine Kontaktfläche mit neutraler thermischer Qualität übertragen: Bei diffuser thermischer Stimulation können mechanische und zugleich thermisch neutrale Reize die thermische Qualität anderer gleichzeitig präsentierter mechanischer Reize übernehmen (z.B. Green, 1979, 1978, 1977a). Green (1978) zeigte darüber hinaus, dass dieser thermische Übertragungseffekt stärker ausgeprägt war, wenn der zusätzlich präsentierte mechanische Reiz warm war (s. Green, 1978).

Die Wahrnehmung mechanischer Reize kann durch gleichzeitige thermische Stimulation intensiviert werden (sog. *thermische Intensivierung*; s. Stevens, 1991). Dieses Phänomen

wurde erstmals von Gustav Weber gezeigt: Kalte Objekte (0°C) wurden als signifikant schwerer wahrgenommen als neutrale (33°C), wobei jedoch die Stärke des Phänomens mit zunehmendem Gewicht nachließ und ein ähnlicher Effekt bei warmen Objekten (45°C) nicht nachgewiesen werden konnte (z.B. Stevens, 1979; Stevens & Green, 1978). Thermische Intensivierung kann unabhängig von der Körperregion für kühle Objekte nachgewiesen werden, ist jedoch bei warmen Objekten nicht an allen Körperregionen gleich stark ausgeprägt. Wurde zusätzlich die Hauttemperatur manipuliert, blieb lediglich der Effekt für kalte Objekte bestehen (z.B. Stevens & Hooper, 1982). Ein umgekehrter Zusammenhang konnte nicht bestätigt werden: Die Erhöhung von Druck führte nicht zu einer veränderten thermischen Wahrnehmung (z.B. Zimmerman & Stevens, 1982).

Textur und Härte. Lederman, Klatzky und Reed zeigten bidirektionale Integration von Textur und Härte (z.B. Lederman & Klatzky, 1993; Lederman, Klatzky & Reed, 1993; Reed, Lederman & Klatzky, 1990; Klatzky, Lederman & Reed, 1989): Objekte wurden schneller identifiziert, wenn Textur und Härte gemeinsam variiert wurden; wurde eine Dimension konstant gehalten und die andere variiert, verschlechterte sich die Performanz. Dies deutet darauf hin, dass beide Dimensionen im Sinne Garner's als integrale Dimensionen zu sehen sind, die wahrnehmungsgebunden verarbeitet werden (vgl. Garner, 1974). Bidirektionale Integration von Textur und Härte blieb jedoch nur bestehen, wenn Größe redundant war (z.B. Reed et al., 1990). Härte und Textur konnten in den berichteten Untersuchungen schwer diskriminiert werden: Dies lag vermutlich an der Schwierigkeit, die Parameter bei realen Objekten systematisch zu variieren, könnte zum andern jedoch auch auf die ausgewählten Explorationsbewegungen zurückzuführen sein (s. Lederman et al., 1993).

Zur besseren Verständlichkeit werden im Folgenden die Materialeigenschaften mit Textur, Härte und Temperatur bezeichnet, während die entsprechende Wahrnehmung als Wahrnehmung der Körnung, der Nachgiebigkeit sowie der Leitfähigkeit bezeichnet wird. Folgende Einflüsse werden in Anlehnung an die oben zitierte Literatur erwartet:

- Hypothese V-1:** Jede Materialeigenschaft beeinflusst die Wahrnehmung (resp. die Empfindungsstärke) der anderen, insbesondere:
- A)** Variation der Materialeigenschaft Temperatur führt zu einer Intensivierung der Empfindungsstärke von sowohl Nachgiebigkeit als auch Körnung (*thermische Intensivierung*).
 - B)** *Bidirektionale Integration* tritt auf: Mindestens Textur und Härte beeinflussen wechselseitig die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit bzw. Körnung. Auch Wahrnehmung der Leitfähigkeit wird von der Variation der Textur und Härte beeinflusst.

Zusätzlich wird erwartet, dass der Einfluss der Materialeigenschaften auf die Empfindungsstärke abhängig von ihrer jeweiligen Ausprägung ist: Eine höhere Ausprägung (Körnung, Nachgiebigkeit, Leitfähigkeit) sollte stärker beeinflusst werden (vgl. z.B. Klatzky, Lederman & Reed, 1989; Sullivan, 1927).

- Hypothese V-2:** Jede Materialeigenschaft (z.B. Textur) beeinflusst die Empfindungsstärke der anderen (z.B. Nachgiebigkeit) in Abhängigkeit von deren Ausprägung (d.h. wenn das Objekt weicher ist).

Zuletzt wird erwartet, dass die Wahrnehmung einer Materialeigenschaft von der Variation der anderen beiden beeinflusst wird.

- Hypothese V-3:** Die Variation zweier Materialeigenschaften (z.B. Härte, Temperatur) beeinflusst die Empfindungsstärke der dritten (z.B. Textur).

Übertragung der (visuellen) Integrationstheorie nach Treisman. Bei Berührung und Manipulation von Objekten nimmt der Mensch bereits innerhalb der ersten 500 ms genügend Informationen über Härte, Textur und Temperatur des Objektes auf. In Abschnitt 2-3 wurde bereits erläutert, dass im Anschluss an diesen „haptic glance“ (Klatzky & Lederman, 1995, p. 1111) spezifische Explorationsbewegungen ausgeführt werden, um die identifizierten Materialeigenschaften exakter wahrnehmen zu können. Darüber hinaus konnte für die drei genannten Materialeigenschaften, zumindest für ihre extremen Ausprägungen, eine parallele Verarbeitung nachgewiesen werden (z.B. Purdy, Lederman & Klatzky, 2004; Lederman & Klatzky, 1997, 1995; Klatzky, Lederman & O'Neill, 1996; vgl. außerdem Sathian & Burton, 1991; Whang, Burton & Shulman, 1991). Räumlich enkodierbare Dimensionen wie Form oder Größe hingegen benötigten eine längere Verarbeitungszeit (z.B. Overvliet, Smeets & Brenner, 2004; Lederman & Klatzky, 1997; Klatzky et al., 1996).

Ähnlich wie Treisman (vgl. Treisman & Gormican, 1988; Treisman & Souther, 1985; Treisman & Schmidt, 1982; Treisman & Gelade, 1980) zeigte, dass visuelle Merkmalsdetektoren wie Farbe oder Form illusionär verknüpft werden können, wenn sie nicht beachtet werden sollen, könnten also auch die drei Objekteigenschaften als haptische Merkmalsdetektoren wirken. Die (visuelle) Integrationstheorie nimmt an, dass bei der Wahrnehmung visueller Reize diese in ihre individuellen Merkmale (z.B. Farbe und Form) zerlegt und, da sie über Merkmalsdetektoren identifiziert werden können, parallel und präattentativ verarbeitet werden (vgl. Treisman & Schmidt, 1982; Treisman & Gelade, 1980). Beschränkung der Aufmerksamkeit bei der visuellen Suche nach Verknüpfungen kann durch Merkmale beeinflusst werden, die nicht direkt beachtet werden, während „all features which co-occur in the same attention 'fixation' [are] (...) conjoined into the correct, unitary whole“ (Treisman & Schmidt, 1982, p. 108).

Wurden Probanden instruiert, nach Verknüpfungen haptischer Merkmale zu suchen, konnte in Übereinstimmung mit Treisman's Arbeit serielle Verarbeitung beobachtet werden (z.B. Purdy et al., 2004; Lederman, Browse & Klatzky, 1988). Eine Beeinflussung durch zusätzliche nicht für die haptische Suche relevante Merkmale wurde nach Kenntnis des Autors noch nicht untersucht.

Aufmerksamkeit. Unter Aufmerksamkeit wird im Allgemeinen „a neural mechanism that allows observers to direct their mental efforts onto specific objects or events“ (Hsiao & Vega-Bermudez, 2002, p. 198) verstanden. Aufmerksamkeit spielt dabei eine gleichgroße Rolle bei der haptischen wie bei der visuellen Wahrnehmung: Nicht alle Informationen aus der Umgebung können verarbeitet werden, so dass eine selektive Auswahl erforderlich wird (für einen Überblick s. Pashler, 1998; Anderson 1991; Garner, 1974). Der haptische Fokus der Aufmerksamkeit kann ebenso variiert werden wie der visuelle: Nach Shiffrin, Craig & Cohen (1973) kann sich der haptische Fokus der Aufmerksamkeit auf den gesamten Körper oder auf beide Hände ohne Informationsverlust erstrecken (z.B. Craig, 1985; Lappin & Foulke, 1973). Interferenzen wurden allerdings beobachtet, wenn Aufmerksamkeit auf zwei Finger einer Hand gerichtet werden sollte (z.B. Loomis, Klatzky & Lederman, 1991; Craig, 1985; Lappin & Foulke, 1973). Den kleinstmöglichen Fokus der Aufmerksamkeit bietet die Fingerspitze (z.B. Hsiao & Vega-Bermudez, 2002; Dorsch, Hsiao, Johnson & Yoshioka, 2001; Loomis et al., 1991).

Zwei grundlegende Verarbeitungsprozesse werden im Allgemeinen unterschieden (und wurden bereits mehrfach angesprochen): Der erste umschließt die Aufnahme von Informationen durch parallele Verarbeitung, ist reizgetriggert (oder bottom-up) und erfolgt ohne Richtung der Aufmerksamkeit, d.h. präattentativ (z.B. Treisman & Schmidt, 1982; Treisman & Gelade, 1980). Der zweite bezieht sich auf (top-down) Prozesse, die eine serielle Verarbeitung erzwingen, wenn auf Verknüpfungen von Reizen die Aufmerksamkeit gezielt gerichtet wird, um relevante Informationen herauszufiltern und andere zu unterdrücken (vgl. Post & Chapman, 1991).

Zum einen kann somit über die Variation des Aufmerksamkeitsfokus' als auch über die Explorationsmethode (reiner Kontakt vs. serielle Prozeduren) die Wahrnehmung der Materialeigenschaften beeinflusst werden. Eine Veränderung der Wahrnehmung sollte mit Reduzierung des Aufmerksamkeitsfokus' einhergehen, aber auch bei Beschränkung der Explorationsmethode erfolgen.

Hypothese V-4: Die Empfindungsstärke der explorierten Materialeigenschaften wird von der Explorationsmethode beeinflusst.

Hypothese V-5: Eine Reduzierung des Aufmerksamkeitsfokus führt zu einer reduzierten Aufmerksamkeit gegenüber der einzelnen Materialeigenschaften.

Hypothese V-6: Die Veränderung der Wahrnehmung sollte zwischen einem breiten Aufmerksamkeitsfokus bei sequentieller Verwendung der Explorationsmethoden, im Vergleich zu einem schmalen Fokus bei reinem Kontakt, am stärksten auftreten.

Veränderungen in den genannten qualitativen Beziehungen (Hypothesen V-1 bis V-3) können auf eine Variation des Aufmerksamkeitsfokus sowie der Explorationsmethode zurückgeführt werden (vgl. Anderson, 1996; Treisman, 1986).

Um diese Fragen schlüssig zu beantworten, sollen die Materialeigenschaften, Textur, Härte, Temperatur, systematisch variiert werden. Für eine adäquate Untersuchung jedoch soll zunächst geklärt werden, welche Eigenschaften des Temperatursinnes berücksichtigt werden müssen, welche Bedeutung die Dauer des Objektkontaktes auf die Wahrnehmung der Temperatur hat und welche Assoziationen mit realen Materialien am häufigsten sind (s. Abschnitt 5-1-2).

Im Anschluss daran werden die oben aufgestellten Hypothesen geprüft (s. Abschnitt 5-1-4).

5-1-2 Vorstudie zur Wahrnehmung von Temperatur

Menschen können sowohl die Stärke als auch die Geschwindigkeit eines Temperaturwechsels gut detektieren (s. Abschnitt 2-5-1), während es ihnen bedeutend schwerer fällt, Unterschiede zwischen Materialien, z.B. anhand ihrer thermischen Eigenschaften zu identifizieren (s. Abschnitt 2-5-2). Am leichtesten fällt die Unterscheidung und Identifikation von Materialien, die wie beispielsweise Holz (oder Nylon) und Aluminium (oder andere Metalle) bzgl. ihrer thermischen Eigenschaften (sowohl Leitfähigkeit als auch Wärmekapazität) stark differieren (s. Abschnitt 2-5-2). Beim Berühren eines Objektes findet entweder ein hoher (hoch leitfähig) oder geringer (niedrig leitfähig) Wärmeaustausch statt; offenbar können Menschen einige Objekte bereits anhand ihrer Wärmeleitfähigkeit erkennen (vgl. Bergmann-Tiest, 2007; Plaisier, 2005). Genügend Informationen scheinen schon innerhalb von ca. 900 ms nach der ersten Berührung gewonnen werden zu können (s. Bergmann-Tiest, 2007; Lederman, Summers & Klatzky, 1996; Russel, 1984). Während Aussagen über Kältereize innerhalb der ersten 500-1.500 ms getroffen werden, liegt die Reizweiterleitungsgeschwindigkeit für Informationen über Wärmereize bei ca. 1-4 s, was eine längere Kontaktzeit für das Wahrnehmen wärmerer Reize erfordert (vgl. Abschnitt 2-5-1).

Offene Fragestellungen. Thermische Eigenschaften von Objekten lassen sich technisch simulieren, so durch Darbietung einer konstanten Temperatur mit Hilfe eines aktiven Temperaturdisplays (z.B. Citérin, Pocheville & Kheddar, 2006; Deml, Mihalyi & Hannig, 2006; Kron, 2005; Yamamoto, Cros, Hashimoto & Higuchi, 2004; Monkman & Taylor, 1993). Nach Jones & Berris (2003, 2002) steht beim Wahrnehmen von thermischen Eigenschaften eines Objektes weniger die thermische Leitfähigkeit im Vordergrund.

Im Gegensatz zu realen Objekten findet demzufolge bei Kontakt mit dem Display der Wärmetransport nicht in Abhängigkeit der Wärmekapazität und thermischen Leitfähigkeit eines realen Objektes statt, sondern allein aufgrund der Leitfähigkeit des Wärmeübergangs zwischen Display und Haut sowie der Größe des Temperaturunterschiedes (die simulierte Wärmekapazität des aktiven Displays kann als unendlich groß angenommen werden). Dies bedeutet dass die Adaptation der Fingerspitze auf die eingeprägte Temperatur bedeutend langsamer auftritt als bei einem realen Objekt, bei dem es zu einem Ausgleich von Objekt- und Fingerspitzentemperatur kommt; wie in Abschnitt 2-5-1 angedeutet adaptiert das subjektive Empfinden langsamer als die Fingerspitze an sich.

Hypothese Va-1: Die über das Temperaturdisplay dargebotene Grundtemperatur beeinflusst die Wahrnehmung ihrer Stärke.

Wie bereits in Abschnitt 2-5 ausführlich dargestellt wurde, unterscheiden sich Wärme- und Kälterezeptoren in der Reizweiterleitungsgeschwindigkeit der ihnen zugeordneten Nervenfasern: Informationen über die Kühle eines Objektes können schneller verarbeitet werden als thermische Stimulierung oberhalb der Indifferenztemperatur (s. Abschnitt 2-5). Aufgrund räumlicher sowie temporaler Summation wird ein zusätzlicher Effekt der Expositionsdauer auf die Stärke der thermischen Empfindung erwartet.

Hypothese Va-2: Die Kontaktdauer mit einer temperierten Fläche beeinflusst die Wahrnehmung ihrer Stärke.

Da die meisten Objekte aus Materialien hoher oder niedriger Leitfähigkeit einen thermischen Eindruck von Kühle oder Neutralität (z.B. Bergmann-Tiest, 2007) hervorrufen, sollte eine unterschiedliche Länge des Kontaktes in Abhängigkeit der Grundtemperatur zu einer unterschiedlichen Empfindung führen: Es wird daher erwartet, dass nicht nur die simulierte Temperatur an sich, sondern auch die Expositionsdauer einen Einfluss auf die Wahrnehmung ihrer Stärke hat. Der Einfluss der Expositionsdauer sollte dabei stärker bei simulierten kühlen Objekten sein.

Hypothese Va-3: Grundtemperatur sowie Kontaktdauer beeinflussen die Wahrnehmung der Stärke der Temperatur besonders bei simulierten kühlen Objekten.

Darüber hinaus wird erwartet, dass die wahrgenommene Temperatur die Wahrnehmung des Materials beeinflusst: Besonders große Unterschiede zwischen den thermischen Eigenschaften können von Menschen gut unterschieden und identifiziert werden (s. Abschnitt 2-5-2). Demzufolge sollten unterschiedliche Grundtemperaturen auch zu qualitativ unterschiedlichen assoziierten Materialien führen.

Hypothese Va-4: Die Materialnennungen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Grundtemperatur: Bei simulierten Objekten, bei denen ein geringer Wärmetransport stattfindet, werden Materialien assoziiert, bei denen ein geringer Wärmetransport stattfindet; dasselbe gilt für Objekte mit hohem resultierendem Wärmetransport.

Da mit zunehmender Kontaktdauer der Wärmetransport erst nach Adaptation der Fingerspitze nach einigen Minuten abnimmt, sollten die Probanden mit unterschiedlicher Kontaktdauer qualitativ unterschiedliche Materialien assoziieren.

Hypothese Va-5: Die Qualität der Nennungen ist abhängig von Grundtemperatur und Kontaktdauer.

5-1-2-1 Methode

Stimulusmaterial. Um den Einfluss der Grundtemperatur und der Expositionszeit auf die Wahrnehmung zu ermitteln, wurden zwei Grundtemperaturen ausgewählt. Da reale Objekte in der Regel raumtemperiert und nicht wärmer als die eigene Hauttemperatur sind (es sei denn, es handelt sich um Objekte, die für diesen Zweck geschaffen wurden, wie z.B. Heizkörper) und bei realen Materialien der Eindruck von Kühle (s. Bergmann-Tiest, 2007) im Vordergrund steht, wurde auf eine dritte Grundtemperatur verzichtet. In Anlehnung an Russel (1984), der eine Grundtemperatur von 23°C bei Metallen gemessen hatte, wurde als Grundtemperatur für die Darstellung von Kühle 23°C und als neutrale Grundtemperatur zum Vergleich die Normaltemperatur der Haut (32°C) ausgewählt.

Um den Einfluss der Darbietungszeit zu untersuchen, wurde die Kontaktdauer so gewählt, dass Kälte- und Wärmereize wahrnehmbar sind: Die 6 unterschiedlichen Darbietungszeiten betragen 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4 s.

Versuchsaufbau. Um die Fingertemperatur während der Untersuchung konstant bei Normaltemperatur (32°C) zu halten, sowie um die beiden Grundtemperaturen 32°C und 23°C unabhängig voneinander darstellen zu können, wurden zwei zusätzliche (zu dem in Abschnitt 4-1-2 eingeführten) Temperaturdisplays konstruiert. Ein Einstellregler erlaubte die Steuerung der Stromzufuhr für eine elektrisch beheizte Wärmeplatte; die Temperatur wurde über einen Thermofühler mit digitaler Anzeige gemessen. Die Kontaktfläche betrug 10 x 10 cm. Das in Abschnitt 4-1-2 zur Temperaturkontrolle beschriebene Temperaturdisplay diente zur Darstellung der Grundtemperatur von 23°C. Die beiden zusätzlichen Displays mit unterschiedlich eingestellten Grundtemperaturen (23°C, 32°C) ermöglichten somit einen problemlosen und zügigen Experimentalablauf.

Während des gesamten Experiments wurden auditive Reize ausgeschlossen: Über geschlossene Kopfhörer erhielten die Probanden Weißes Rauschen. Die Kontaktdauer wurde dem Probanden zusätzlich durch Tonsignale eingespielt. Alle Reizproben wurden in der in Abschnitt 4-1-2 beschriebenen Experimentalbox hinter dem Vorhang parallel zur Oberfläche des Tisches präsentiert.

Versuchsdesign. Die aufgrund der Fragestellungen zu manipulierenden Faktoren sind die beiden *Grundtemperaturen* (32°C, 23°C) sowie die *Dauer des Kontakts* mit der temperierten Fläche (0,5 bis 4 s); der Einfluss beider Faktoren auf die Wahrnehmung der Stärke der Temperatur sollte erfasst werden sowie die Assoziation der Probanden von realen Objekten oder Materialien mit den simulierten thermischen Reizproben bei Kontakt. Um für ein einheitliches Konstrukt zu sorgen, wurden die Probanden während der gesamten Untersuchung gebeten, sich auf die Wahrnehmung der thermischen Leitfähigkeit zu konzentrieren; ihr Wissen um die thermische Leitfähigkeit von Objekten wurde über einen Vorwissenstest abgefragt. Alle zwölf Reize wurden der Testperson je fünfmal randomisiert dargeboten.

Experimenteller Ablauf. Vor Versuchsbeginn wurden die Probanden instruiert, dass das Ziel der Untersuchung die Wahrnehmung von thermischer Leitfähigkeit unterschiedlicher Objekte sei; Leitfähigkeit wurde definiert als die Stärke der Veränderung der Fingertemperatur bei Kontakt mit einem Objekt. Um den Wissensstand der Probanden festzustellen, füllten sie einen Vorwissenstest aus, in dem sie aufgefordert wurden, für niedrige und hohe Leitfähigkeit Materialien zu benennen. Vor dem eigentlichen Hauptexperiment hatten die Probanden Gelegenheit, die Prozedur an drei Beispielproben zu testen (einem Eisenblock, einem Silikonwürfel sowie einem Stück Holz). Im Anschluss daran wurden die Probanden gebeten, ihre Hände zu waschen und gründlich zu trocknen, um einen Einfluss der Fingerfeuchtigkeit zu reduzieren.

Nach Adaptation der Fingertemperatur für mindestens 5 Minuten auf 32°C wurde die Fingertemperatur gemessen und protokolliert (wie auch vor Adaptation sowie am Ende des Hauptexperiments). Während der Adaptation wurden die Probanden instruiert, dass ihre Aufgabe im Folgenden sein würde, unterschiedliche Objekte bezüglich ihrer thermischen Leitfähigkeit zu unterscheiden; es wurde zu keinem Zeitpunkt erwähnt, dass alle Reize über ein Temperaturdisplay simuliert wurden. Vielmehr wurden die Probanden darauf hingewiesen, dass der einzige Unterschied zwischen den dargebotenen Reizproben in der Leitfähigkeit bestünde. Die Expositionsdauer wurde über Tonsignale kontrolliert; die Probanden wurden zusätzlich instruiert sofort nach Beendigung der Exploration die Hand zurück auf das Temperaturdisplay zu legen, um eine Readaptation der Fingertemperatur zu gewährleisten.

Nach Exploration der simulierten Temperatur beurteilten die Probanden die Stärke thermischer Leitfähigkeit des dargebotenen Materials, indem sie ihrer subjektiv wahrgenommenen Stärke thermischer Ausprägung eine Zahl zwischen 1 (sehr niedrig leitfähig) und 10 (sehr hoch leitfähig) einen beliebigen Zahlenwert zuordnen sollten – auch Dezimalzahlen und Brüche waren erlaubt –, der die von ihnen wahrgenommenen Stärke am besten wiedergab. Im Anschluss daran nannte die Person jene Materialien oder Objekte, die sie mit der gespürten Leitfähigkeit spontan assoziierten.

Nach Beendigung des Hauptexperiments beantworteten die Probanden auf einer 5-stufigen Ratingskala, wie leicht es Ihnen gefallen war, zu den unterschiedlichen gefühlten Objekten Materialien oder Objekte zu assoziieren (1 sehr leicht, 5 sehr schwer).

Statistische Analyse. Die individuellen Ratings der Leitfähigkeit (Werte zwischen 1-10) wurden normiert und in Prozent umgerechnet. Da die wiederholte Darbietung ($F(4,24)=1.423$, $p=0.257$) keinen Effekt auf die Ratings hatte, wurde pro Reiz der Mittelwert der Bewertungen gebildet. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholungen prüfte den Einfluss von *Kontaktdauer* sowie *Grundtemperatur* auf die Einschätzung der ausgeprägten Stärke auf dem 5%-Signifikanzniveau; Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

Im Anschluss daran erfolgt eine deskriptive Auswertung der Materialnennungen zuerst für den Vorwissenstest, dann für die Nennungen während des Hauptexperiments. Materialien mit einer spezifischen Wärmekapazität unter 1 kJ / kg x K) wurden als hoch leitfähig betrachtet (vgl. Jones & Berris, 2003, 2002; Ino et al., 1993).

5-1-2-2 Ergebnisse

Stichprobe. An der Vorstudie (Va) „Wahrnehmung von Materialeigenschaften – Voruntersuchung zur Wahrnehmung von Temperatur“ nahmen acht Studenten der Universität der Bundeswehr München (6 Männer, 2 Frauen) teil. Sie waren im Mittel 25 Jahre alt und alle Rechtshänder.

Kontrolle der Temperatur. Die Raumtemperatur konnte nicht geregelt werden und wurde deshalb protokolliert; sie betrug für alle Probanden im Mittel 21°C (Standardabweichung 0.4°C). Die Handtemperatur vor Adaptation lag bei 32°C, vor Testung bei 33°C und nach Testung bei 32°C. Die Temperaturkontrolle kann als adäquat kontrolliert angesehen werden.

Einfluss der Darbietungszeit auf Bewertung. Eine ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren Grundtemperatur und Expositionsdauer wurde für die eingeschätzte Ausprägungsstärke thermischer Leitfähigkeit berechnet. Der Haupteffekt Grundtemperatur wurde statistisch signifikant ($F(1,7)=86.54$, $p<0.001$; $\eta^2=0.93$). Wie in Abbildung 5-1 zu ersehen ist, bewerteten die Probanden die Grundtemperatur von 23°C als deutlich leitfähiger. Ein Einfluss der Darbietungszeit zeichnete sich nicht ab. Weder der Haupteffekt Präsentationsdauer ($F(5,35)=0.79$, $p=0.570$) noch die Interaktion ($F(5,35)=2.38$, $p=0.058$) werden statistisch signifikant.

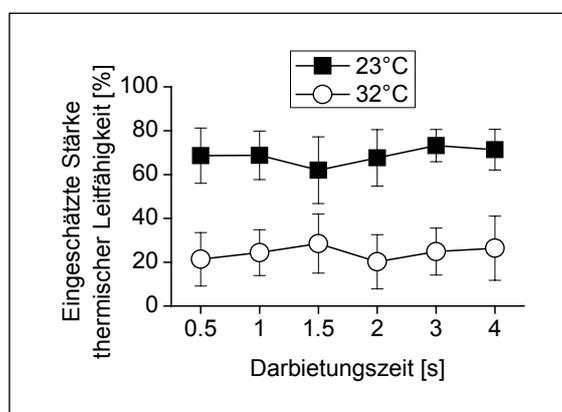


Abb. 5-1 Einschätzungen der Stärke wahrgenommener thermischer Leitfähigkeit für die beiden Grundtemperaturen (23°C, 32°C) abgetragen über die Darbietungszeit.

Vertrauensrating. Die Probanden gaben auf einer 5-stufigen Skala an, dass es ihnen sehr schwer fiel (Mittelwert 4.6, Standardabweichung 0.5), überhaupt Materialien zu den gespürten Temperaturen (in Abhängigkeit der Darbietungszeit) zu benennen.

Vorwissenstest. Im Vorwissenstest nannten die Probanden folgende Materialien mit geringer thermischer Leitfähigkeit (jeweils bezogen auf alle Probanden, unabhängig von Mehrfachnennungen): Holz (100%), Plastik¹⁴ (87.5%), Styropor (25%), Textilien (25%), weitere¹⁵. Insgesamt variierte die Anzahl der Nennungen zwischen 2-6 mit einem Median von 4.5 Nennungen. Zwei Materialien wurden falsch zugeordnet (Stein: 25%; Keramik: 12.5%). Folgende Materialien mit hoher thermischer Leitfähigkeit wurden aufgezählt: Keramik (62.5%), Aluminium (50%), Eisen (50%), Kupfer (50%), Metall (50%), Glas (50%), Gold (37.5%), Stein (25%), Messing (25%), andere¹⁶. Die Anzahl der Nennungen variierte zwischen 3-6 Nennungen mit einem Median von 4.5 Nennungen. Es traten keine Falschnennungen von Objekten mit geringer Leitfähigkeit auf.

Die Anzahl der Nennungen in Abhängigkeit der Leitfähigkeit war innerhalb der Personen ausgewogen: Es überwog eher die Nennung von Materialien hoher Leitfähigkeit (Verhältnis variiert zwischen 0.67-1.00 mit einem Median von 0.92).

¹⁴ Unter der Bezeichnung „Plastik“ werden folgende Nennungen zusammengefasst: Plastik, Kunststoff, Polyamid, PVC, Silikon

¹⁵ Papier, Sand, Bernstein, Beton, Kork, (Silizium); außerdem Keramik.

¹⁶ Titan, Platin, Stahl, (Wasser, Wolfram).

Einfluss der Darbietungszeit auf die Materialnennung. Folgende Materialien wurden im Anschluss an die Präsentation der Experimentalbedingungen am häufigsten assoziiert: Metall und Plastik (je 87.5%); Aluminium (62.5%); Eisen, Glas, Holz, Kupfer und Textilien (je 50%); Messing und Papier (je 37.5%); Keramik, Stein und Stahl (je 25%); Styropor (12.5%). Dabei wurden die Materialien zwischen 56-100% korrekt zugeordnet¹⁷. Die häufigsten relativen (d.h. bezogen auf die Gesamtzahl ihrer Nennungen) Verwechslungen traten, wie auch in Tabelle 5-1 ersichtlich, für Glas (45%), Holz (19%) und Metall (13%) auf. Interessanterweise findet während des Hauptexperiments keine Falschzuweisung von Keramik und Stein statt, obwohl einige Probanden im Vorwissenstest diese falsch zugeordnet hatten.

Tabelle 5-1 Relative Häufigkeit der Materialnennungen bezogen auf die jeweiligen Gesamtnennungen, sowie die dazugehörigen thermischen Eigenschaften der Materialien.

Nennung ges.	Material	Grundtemperatur 23°C Darbietungszeiten:						Grundtemperatur 32°C Darbietungszeiten:						Spezif. Wärmekapazität [kJ / kg x K]	Wärmeleitfähigkeit [W / K x m]
		0.5s	1s	1.5s	2s	3s	4s	0.5s	1s	1.5s	2s	3s	4s		
82	Metall	0.16	0.15	0.12	0.15	0.15	0.15	0.01		0.06	0.01	0.04	0.01		
21	Kupfer	0.14	0.19	0.14	0.05	0.10	0.29						0.10	380	0.38
46	Aluminium	0.17	0.09	0.11	0.26	0.13	0.15		0.02	0.04		0.02		220	0.90
4	Messing		0.25	0.25		0.25	0.25							111	0.39
10	Keramik		0.30	0.10	0.20	0.20	0.20							90	0.90
9	Eisen				0.33	0.33	0.11		0.22		0.11			74	0.45
33	Stahl	0.12	0.21	0.15	0.15	0.15	0.03	0.03			0.06	0.03	0.09	50	0.45
10	Stein	0.20	0.10	0.10		0.40	0.30							3.30	0.84
57	Glas	0.09	0.11	0.04	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09	0.11	0.05	0.09	0.14	1.36	0.73
13	Papier							0.08	0.08	0.15	0.31	0.31	0.08	0.26	1.50
134	Plastik	0.01	0.01	0.04	0.04	0.01	0.01	0.15	0.15	0.16	0.13	0.13	0.15	0.17	0.90
66	Holz	0.06	0.02	0.11		0.02	0.03	0.15	0.15	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	1.70
25	Textilien			0.04				0.16	0.16	0.12	0.20	0.12	0.20	0.04	1.50
2	Styropor							0.50					0.50	0.04	1.20

Wie Tabelle 5-1 entnommen werden kann, lässt sich eine Häufigkeitsgruppierung einzelner Materialien in Abhängigkeit der Grundtemperaturen finden: Wurde das Temperaturdisplay auf einer Grundtemperatur von 23°C gehalten, wurden v.a. Materialien unterschiedlicher Metalle, sowie Keramik und Stein genannt. Bei einer Grundtemperatur von 32°C wurden v.a. Materialien geringer spezifischer Wärmekapazität und -leitfähigkeit assoziiert.

Des Weiteren zeigen sich Tendenzen qualitativer Unterschiede in der Nennung von Materialien in Abhängigkeit der Zeit (vgl. Tabelle 5-1). Die unspezifische Nennung „Metall“ wird nicht in Abhängigkeit der Zeit häufiger oder seltener genannt; Kupfer wird häufiger bei 4 s Kontaktzeit, Aluminium bei 2s Kontaktzeit benannt, Stahl bei 1s. Dies entspricht der spezifischen Wärmekapazität: Ein hoher Wert steht für einen Eindruck größerer Kühle bei Kontakt. Alle anderen Werte zeigen eine zu geringe Gesamtnennungshäufigkeit.

¹⁷ Korrekte Zuordnung der hoch leitfähigen Materialien Messing, Keramik und Stein (je 100%), Aluminium (91%), Kupfer (90%), Metall (87%), Stahl (79%), Eisen (67%), Glas (56%).
Korrekte Zuordnung der niedrig leitfähigen Materialien Papier und Styropor (je 100%), Textilien (96%), Plastik (88%), Holz (77%).

5-1-2-3 Diskussion

Die Voruntersuchung zur Präsentation von thermischer Materialqualität über die Simulation einer konstanten Temperatur zeigte, dass die Probanden allein zwischen den Grundtemperaturen unterschieden (Hypothese Va-1), die Darbietungszeit jedoch keinen Einfluss auf die Bewertung der Stärke thermischer Leitfähigkeit (Hypothese Va-2) noch einen differentiellen Einfluss (Hypothese Va-3) ausübt (s. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für die Vorstudie Va „Wahrnehmung von Materialeigenschaften – Voruntersuchung zur Wahrnehmung von Temperatur“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
Va-1 Die über das Temperaturdisplay dargebotene Grundtemperatur beeinflusst die Wahrnehmung ihrer Stärke	bestätigt	$\eta^2=0.93$
Va-2 Die Kontaktdauer mit einer temperierten Fläche beeinflusst die Wahrnehmung ihrer Ausprägungsstärke	n. bestätigt	
Va-3 Grundtemperatur und Kontaktdauer beeinflussen die Wahrnehmung der Stärke der Temperatur, besonders bei simulierten kühlen Objekten	n. bestätigt	
Va-4 Die Materialnennungen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Grundtemperatur	bestätigt	deskriptiv
Va-5 Die Qualität der Nennungen ist abhängig von Grundtemperatur und Kontaktdauer	n. bestätigt	

Darüber hinaus wiesen, wie erwartet (Hypothese Va-4), die Probanden den simulierten Grundtemperaturen Objekte oder Materialien zu, die hoch leitfähig waren, wenn die Grundtemperatur 23°C betrug, oder gering leitfähig waren, wenn sie 32°C betrug. Im Vorwissentest zeigte sich, dass die Leitfähigkeit benannter Materialien bzgl. ihrer Leitfähigkeit fast immer korrekt war. Ordneten die Probanden assoziierte Materialien der gefühlten Stärke thermischer Leitfähigkeit zu, waren die Zuordnungen in den meisten Fällen korrekt. Es zeigte sich bei der Variation der Expositionszeit an die Grundtemperatur von 23°C die Tendenz, qualitativ unterschiedliche Materialien zu assoziieren (Hypothese Va-4). Obwohl die Probanden angaben, dass ihnen die Assoziierung von Materialien an die dargebotenen Versuchsbedingungen schwer gefallen war, benannten sie jedoch sehr viele Materialien richtig.

Das Ergebnis dieser Vorstudie replizierte außerdem (s. auch Abschnitt 2-5), dass eine Veränderung der Temperatur durch Kühlung bereits um 500 ms wahrnehmbar ist. Allein eine Temperaturänderung kann zur Assoziation unterschiedlicher Materialien beitragen. Auch wenn die Temperatur demzufolge lediglich durch eine konstante Temperatur (d.h. nicht durch Simulation der Temperaturänderung) dargeboten wird, werden Materialien assoziiert. Dabei scheint die Dauer des Kontakts (zumindest bis 4 s) keine Rolle zu spielen.

5-1-3 Methode zur Untersuchung intrahaptischer Illusionen

Um die Hypothesen zum Einfluss unterschiedlicher Materialeigenschaften auf die Empfindungsstärke bei unterschiedlicher Aufmerksamkeitsfokussierung sowie Explorationsmethode zu testen, wurde eine Umsetzung von Stimuli nötig, die eine einheitliche und systematische Manipulation der einzelnen Materialeigenschaften erlaubt.

Stimulusmaterial. Die zu explorierenden Objekte müssen in den drei Materialeigenschaften Textur, Härte und Temperatur variieren. Um Objekte zu konstruieren, die sich allein in ihrer Temperatureigenschaft voneinander unterscheiden, nicht jedoch in ihrem zugrunde liegenden Material (wie dies bei Holz bzw. Metall der Fall sein würde), wurde die Leitfähigkeit der Objekte in Anlehnung an die Vorstudie über eine Variation der Oberflächentemperatur und somit der Größe des Wärmeaustauschs zwischen Finger und Objekt umgesetzt. Da für alle Objekte die gleichen Eigenschaften gelten müssen, wurde ein Pin-Display konstruiert, das Oberflächentextur und Objekthärte übertragen kann und dessen Pins in ihrer Oberflächentemperatur variiert werden können (s. Abbildung 5-2). Das Pin-Display wurde aus zwei Lochblechen à 29 x 40 cm konstruiert, deren Lochdurchmesser 1 mm und deren Lochabstand 2 mm betrug. Die Pins bestanden aus handelsüblichen Stecknadeln (Firma Rayher Hobby GmbH) mit einer Länge von 45 mm und einem Kopfdurchmesser von 13 mm und bedeckten eine Fläche von 25 x 25 cm. Um eine leichte Führung der Pins zu erlauben, wurden die beiden Lochbleche mit einem Abstand von 15 mm zueinander verschraubt. Der Abstand zwischen unterem Lochblech zum Boden betrug 40 mm.

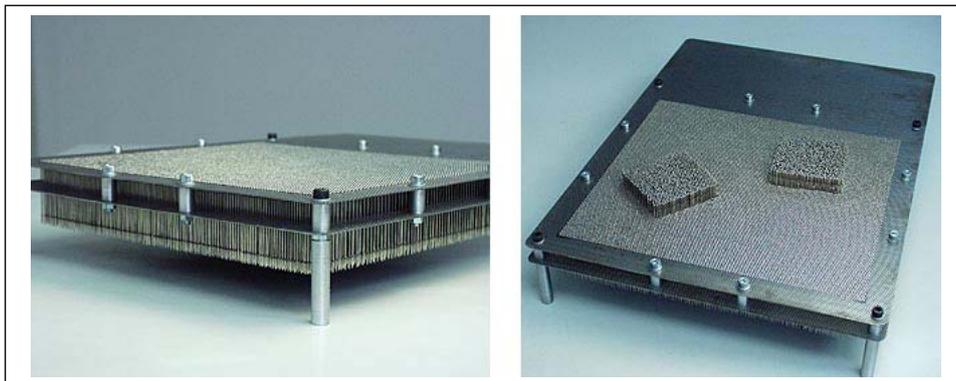


Abb. 5-2 Pin-Display zur systematischen Variation der Materialeigenschaften Textur, Härte und Temperatur.

Die Objektproben zur Darstellung von Härte, Oberflächentextur und -temperatur wurden über vier Stimuli dargestellt, deren Oberflächentextur und Härte variierte, während die Oberflächentemperatur über Veränderung der Pin-Display-Temperatur manipuliert werden konnte. Die Stimuli bestanden aus Silikonwürfeln mit einer Grundfläche von 80 x 80 mm und einer Höhe von 50 mm. Die Würfel wurden wie in Abschnitt 4-3-2-1 erläutert aus den beiden Silikongrundtypen mit Shore-A Härte von 12 (weich) und 60 (hart) hergestellt. Jeweils ein harter und ein weicher Würfel wurden mit einer zusätzlichen Oberflächenstruktur von ca. 1.3 mm räumlicher Periode versehen, so dass sie sich von der durch den 2-mm-Pin-Abstand bedingte Oberflächenstruktur der glatten Probe unterschied.

Diese vier Grundproben (vgl. Abbildung 5-3) wurden mit einer der folgenden Oberflächentemperaturen dargeboten: Zimmertemperatur (ca. 20°C) für die Simulation von Objekten hoher Temperaturleitfähigkeit (z.B. Metalle) sowie Normaltemperatur der Haut (ca. 32°C) für die Simulation von Objekten geringer Temperaturleitfähigkeit (z.B. Plastik), wie im Vorexperiment als ausreichend ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 5-1-2), zusätzlich eine Temperatur von ca. 37°C, da in der Literatur von Assoziationen zwischen der Weichheit eines Objektes und seiner Wärme berichtet wurden (vgl. Sullivan, 1927).

Der Fokus der Aufmerksamkeit wurde über die Anzahl der innerhalb eines Trials zu bewertenden Eigenschaften variiert. Die Breite hing demzufolge mit der Anzahl zusammen: Mit größerer Anzahl zu beachtender Items, erweiterte sich die Breite des Fokus. Es konnte entweder eine, zwei oder alle drei Eigenschaften beurteilt werden.

Neben den adäquaten Explorationsmethoden für jede Materialeigenschaft (s. Abschnitt 2-2) wurde als weitere Explorationsart Ausüben von leichtem Druck, unabhängig von der entsprechenden präsentierten Materialeigenschaft, ausgewählt. Explorationsart (3 Methoden vs. 1 Methode) wurde als Zwischengruppenfaktor gewählt.

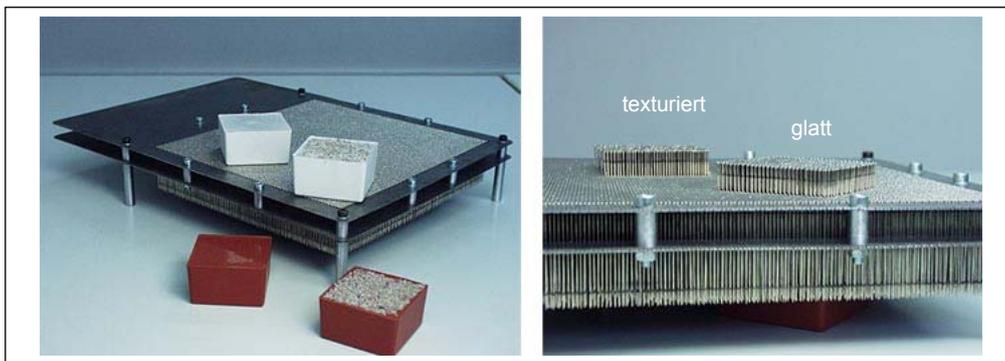


Abb. 5-3 Die insgesamt 2x2x3 Reize bestehen aus zwei Silikonwürfeln mit und zwei ohne Struktur jeweils unterschiedlicher Härte (hart, weich). Die Oberflächentemperatur wurde durch Variation der Display-Temperatur (20°C, 32°C, 37°C) verändert.

Experimenteller Aufbau. Die Hauttemperatur der explorierenden Hand wurde durch das in Abschnitt 4-1-2 vorgestellte Temperaturdisplay auf eine Temperatur von 32°C adaptiert. Die Temperatur der Haut wurde vor und nach Adaptation sowie zu Testende mit dem in Abschnitt 4-2-2 vorgestellten digitalen Präzisionsthermometer gemessen. Die Raumtemperatur wurde protokolliert.

Mittels eines Heißluftgebläses wurden die Pins erwärmt, um Temperaturen von 32°C oder 37°C darzustellen. Mit einem Infrarot Thermometer (Firma TFA) wurde die Temperatur vor Trialbeginn kontrolliert. Die Anzeigenauflösung lag bei 0.1°C mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1.5^\circ\text{C}$ und einem Messbereich von 0°C bis 50°C. Temperaturen von 20°C entsprachen der Raumtemperatur, d.h. in dieser Bedingung wurde die Temperatur des Displays nicht aktiv variiert.

Die durch das Pin-Display dargebotenen Reizproben unterschiedlicher Textur, Körnung und Leitfähigkeit wurden in der in Abschnitt 4-1-2 vorgestellten Experimentalbox dargeboten, um visuelle Reize auszuschließen. Um auditive Cues, die besonders beim Temperieren der Pins durch das Heißluftgebläse entstanden, zu minimieren, trugen die Probanden geschlossene Kopfhörer, über die ihnen Weißes Rauschen sowie die Tonsignale für Start und Ende der Reizpräsentationen eingespielt wurden.

Versuchsdesign. Explorationsmethode war Zwischengruppenfaktor und wurde zweistufig manipuliert: Die Objekteigenschaften wurden entweder unter sequentieller Verwendung der adäquaten Methoden (Gruppe M3) oder unter Verwenden einer *Explorationsmethode*, nämlich Ausüben von leichtem Druck (Gruppe M1) untersucht.

Fokus der Aufmerksamkeit (Bewertung einer, von zwei oder aller drei Dimensionen), wie auch Variation der einzelnen Objekteigenschaften waren jeweils Innersubjektfaktoren. Die Objekteigenschaften waren *Textur* (hoch, gering) sowie *Härte* (hoch, gering) und *Temperatur der Pin-Display-Oberfläche* (20°C, 32°C, 37°C). Während Textur und Härte vollständig problemlos variiert werden konnten, musste die Variation der Oberflächentemperatur über drei Testtage verteilt werden.

Insgesamt bewerteten die Probanden 84 Reize innerhalb einer Sitzung, d.h. 252 Reize insgesamt. Die Reihenfolge der zu beurteilenden Materialeigenschaften war pro Testtag randomisiert; zusätzlich wurde keine Materialeigenschaft bei zwei folgenden Trials direkt nacheinander dargeboten, d.h. eine am Ende eines Trials beurteilte Materialeigenschaft wurde nicht zu Beginn des folgenden Trials präsentiert.

Experimenteller Ablauf. Die Probanden nahmen an einem Tisch vor der Experimentalbox Platz; das Temperaturdisplay wurde auf der Seite der dominanten Hand aufgestellt. Die Stimuli wurden den Probanden hinter dem Vorhang parallel zur Oberfläche des Tisches unter dem Pin-Display präsentiert. Um zu verhindern, dass die Feuchtigkeit der Hände die Wahrnehmung der Temperatur beeinflusst, wurden die Probanden gebeten vor Testbeginn ihre Hände zu waschen und sehr gründlich zu trocknen. Im Anschluss daran wurde die Handtemperatur der Probanden mindestens fünf Minuten auf Normaltemperatur (32°C) über das Temperaturdisplay adaptiert. Die aktuelle Fingertemperatur wurde vor Adaptation sowie vor und nach der Testung gemessen und protokolliert.

Während der Adaptation der Finger wurden die Probanden instruiert, wie sie die einzelnen Materialeigenschaften explorieren sollten, die ihnen visuell vor Trialbeginn angezeigt wurden. Während Gruppe M3 die für jede Materialeigenschaft spezifische Explorationsmethode (s. Abschnitt 2-3) anwenden sollte, d.h. laterale Bewegung für Textur, Ausüben von leichtem Druck für Härte und statischer Kontakt für Temperatur, wurde Gruppe M1 gebeten, unabhängig von der angezeigten Materialeigenschaft die Reizprobe stets durch Ausüben von leichtem Druck zu explorieren.

Jede Eigenschaft war dabei auf einer Skala von 1 (gering gekörnt, gering nachgiebig, gering leitfähig) bis 10 (hoch gekörnt, hoch nachgiebig, hoch leitfähig) zu beurteilen; Brüche und Dezimalzahlen waren erlaubt. Die Probanden wurden gebeten, die Zahl, die am ehesten zu der von ihr gespürten Stärke der Ausprägung der Materialeigenschaft passt, auszuwählen und in Reihenfolge der zu beurteilenden Eigenschaften zu benennen.

Der Fokus der Aufmerksamkeit wurde durch Variation der Anzahl der während eines Trials zu beachtenden Eigenschaften variiert: Vor Beginn eines Trials wurden dem Probanden visuell die der Reihe nach zu beurteilenden Eigenschaften visuell dargeboten. Demzufolge wurden innerhalb eines Trials entweder eine, zwei oder alle drei Eigenschaften bezüglich ihrer Ausprägungsstärke bewertet.

Die Reizpräsentationszeit betrug 1.5 s. Zum einen wurde diese Zeit ausgewählt, um die Reizbedingungen für alle Bedingungen konstant zu halten, zum anderen, um eine Wahrnehmung der Bedingung „warm“ zu erlauben (s. Abschnitt 5-1-2; ansonsten wäre eine kürzere Zeit ausreichend gewesen). Während des Intertrial-Intervalls mit einer Zeitdauer von ca. 3 s wurde die Handtemperatur readaptiert.

Vor Beginn der Testung wurde dem Probanden die Gelegenheit gegeben, die Anwendung der Explorationsmethode(n) ihrer jeweiligen Gruppe (M3, M1) sowie die Beurteilung der Eigenschaften zu üben und sich mit dem Ablauf vertraut zu machen. Dazu wurden je drei Reize ausgewählt, die nicht während des Experiments präsentiert wurden: Stimuli mit unterschiedlicher Körnung (entnommen aus den in Abschnitt 4-1-2 dargestellten Reizen), Nachgiebigkeit (entnommen aus den in Abschnitt 4-3-2-1 dargestellten Reizen) sowie thermischer Eigenschaft (Holz, Metall).

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurde die Effektivität der Kontrolle der experimentellen Variation für die gesamte Stichprobe überprüft (s. Abschnitt 5-1-4-1). Vor Hypothesenprüfung wurden alle individuellen Beurteilungen der einzelnen Materialdimensionen pro Proband normiert, so dass ihre geringste Ausprägung 1% und die höchste 100% ent-

spricht¹⁸. Die wiederholten Messwerte wurden gemittelt.

Aufmerksamkeitsfokus wurde als vierstufiger Faktor betrachtet, da die Beurteilung von je zwei Merkmalen in zwei Kombinationsmöglichkeiten auftreten konnte; zusätzlich zählte das Achten auf einen oder alle drei Merkmale dazu. Der Einfluss der Variation der Materialeigenschaften (*Textur, Härte, Pin-Temperatur*) sowie der *Aufmerksamkeitsfokus* und die gewählte *Explorationsmethode* wurde mit einer fünffaktoriellen multivariaten ANOVA (MANOVA) für die drei abhängigen Variablen (Bewertung der Nachgiebigkeit, Körnung sowie Leitfähigkeit) geprüft (s. Abschnitt 5-1-5-2). Als Prüfgröße der MANOVA wurde Pillai-Spur herangezogen (z.B. Olson, 1976, 1979).

Ausschließlich signifikante Effekte wurden im Anschluss an die MANOVA daran mit getrennten ANOVAs betrachtet (s. Bray & Maxwell, 1982): Zuerst wurde der Einfluss der Materialeigenschaften untereinander (s. Abschnitt 5-1-5-3), im Anschluss daran der Einfluss von Explorationsmethode und Fokus der Aufmerksamkeit betrachtet (s. Abschnitt 5-1-5-4). Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert; das Signifikanzniveau liegt bei 1%.

5-1-4 Experimentalblock V – Intrahaptische Illusionen

5-1-4-1 Stichprobe und Kontrolle der experimentellen Variation

Stichprobe. Am Experimentalblock V „Wahrnehmung von Materialeigenschaften“ nahmen insgesamt 30 Studenten der Universität der Bundeswehr München teil. 15 von ihnen (5 Frauen, 10 Männer) untersuchten die Materialeigenschaften mit 3 Methoden (Gruppe M3). Ihr mittleres Alter betrug 24 Jahre; nur eine der Personen war Linkshänder. Die restlichen 15 (5 Frauen, 10 Männer) wurden gebeten, die Reize durch Ausüben von leichtem Druck zu explorieren (Gruppe M1). Sie waren im Mittel 24 Jahre alt; 13 von ihnen waren Rechtshänder.

Kontrolle der Temperatur. Die Raumtemperatur lag im Mittel bei 21°C (sd = 1°C).

Die gemessenen Handtemperaturen vor Adaptation lagen bei 26 bis 28°C; Unterschiede zwischen den Testzeitpunkten waren nicht statistisch signifikant ($\chi^2=0.521$, $p=0.771$). Nach Adaptation betrug die Handtemperatur 31°C (sd = 1°C; kein Unterschied zwischen den Testzeitpunkten: $\chi^2=2.293$, $p=0.318$) und zu Testende 32°C (sd = 1°C; kein Unterschied zwischen den Testzeitpunkten: $\chi^2=1.842$, $p=0.398$).

Die Temperatur des Pin-Displays betrug bei Raumtemperatur 22.5°C (sd = 1°C), bei Erwärmung auf Handtemperatur 32°C (sd = 1°C) bzw. bei Erwärmung 37°C (sd = 0.5°C). Unterschiede innerhalb einer Sitzung waren nicht statistisch signifikant (Pin-Temperatur bei Handtemperatur: $\chi^2=1.350$, $p=0.509$; bei 37°C: $\chi^2=0.454$, $p=0.797$; bei Raumtemperatur: $\chi^2=5.443$, $p=0.066$).

Die Umsetzung unterschiedlicher Pin-Temperatur sowie der Adaptation der Fingertemperatur kann somit als erfolgreich angenommen werden.

¹⁸

$$x_{\text{neu}} = \frac{x_{\text{aktuell}} - x_{\text{MAX}}}{x_{\text{MAX}} - x_{\text{MIN}}} \cdot 99 + 100$$

Kontrolle der experimentellen Variation. In Tabelle 5-4 können die Beurteilungen der Probanden für die einzelnen Ausprägungen der 12 präsentierten Reize entnommen werden. Die Werte entsprechen den erwarteten Bewertungen: Höhere Werte stehen für höhere Ausprägungen der Leitfähigkeit (20°C, 37°C), Körnung (texturiert), Härte (weich). Vorwegnehmend werden die Ergebnisse aus den getrennten Varianzanalysen berichtet, um zu prüfen, ob die Manipulationen einer Materialeigenschaften sich auch auf die bewertete Empfindungsstärke abbildet (s. Abschnitt 5-1-5-3).

Tabelle 5-4 Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Beurteilungen der manipulierten Materialeigenschaften.

	manipulierte Materialeigenschaft des Objekts						
	Temperatur			Härte		Textur	
	32°C	37°C	20°C	hart	weich	glatt	texturiert
MW [%]	30.0	75.8	65.5	14.4	72.2	15.8	70.2
SD [%]	1.5	1.8	1.1	1.5	1.6	2.2	3.2

Die Unterschiede sind statistisch signifikant: Der Haupteffekt Härte auf die Beurteilung der Nachgiebigkeit ($F(1,28)=982.72$, $p<0.01$; $\eta^2=0.972$), der Haupteffekt Textur auf die Beurteilung der Körnung ($F(1,28)=587.86$, $p<0.01$; $\eta^2=0.955$), sowie der Haupteffekt Temperatur auf die Bewertung der Leitfähigkeit ($F(2,56)=81.58$, $p<0.01$; $\eta^2=0.744$) werden in die erwartete Richtung (vgl. Tabelle 5-4) signifikant. Bonferroni-post-hoc Tests zeigen signifikante Unterschiede in der Beurteilung der Leitfähigkeit für Pin-Temperaturen von 20°C und 32°C ($p<0.01$) sowie 32°C und 37°C ($p<0.01$), nicht jedoch zwischen 20°C und 37°C ($p=0.036$).

5-1-4-2 Gesamtbetrachtung der Daten: Ergebnisse der MANOVA

In Tabelle 5-5 sind die Ergebnisse der fünffaktoriellen MANOVA abgetragen, die für die Beantwortung der Fragen relevant sind; alle übrigen Effekte können in Anhang C nachgelesen werden (sie sind jedoch alle statistisch nicht bedeutsam oder effektschwach). Der Einfluss der Explorationsmethode wird in Abschnitt 5-1-4-4 betrachtet. Neben den erwarteten Effekten wurde zusätzlich unerwartete und statistisch signifikante, wenn auch unerwartete Effekt wurde mit in Tabelle 5-5 aufgenommen: Die Interaktionen zwischen Explorationsmethode und der Materialeigenschaft Härte oder thermischer Leitfähigkeit.

Tabelle 5-5 Ausgewählte Ergebnisse der fünffaktoriellen MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) für die Beurteilung der Nachgiebigkeit, Körnung sowie Leitfähigkeit. (Die übrigen F-Statistiken sind in Anhang C).

	F (df)	p	η^2
HE Härte	405.65 (3,26)	< 0.01	0.979
HE Textur	203.75 (3,16)	< 0.01	0.959
HE Temperatur	12.02 (6,110)	< 0.01	0.396
WW Textur x Härte	10.72 (3,26)	< 0.01	0.553
WW Textur x Temperatur	0.84 (6,110)	0.541	0.044
WW Härte x Temperatur	1.11 (6,110)	0.363	0.057
WW Textur x Härte x Temperatur	1.13 (6,110)	0.349	0.058
HE Fokus	1.46 (9,252)	0.162	0.050
WW Fokus x Exploration	0.91 (9,252)	0.520	0.031
WW Härte x Exploration	8.58 (3,26)	< 0.01	0.498
WW Temperatur x Exploration	3.52 (6,110)	< 0.01	0.161

In den folgenden Abschnitten wird getrennt auf die Bewertung der einzelnen Materialeigenschaften, die bei systematischer Variation der dargebotenen Eigenschaften abgegeben wird, eingegangen (s. Abschnitt 5-1-4-3) und im Anschluss daran auf den Einfluss von Explorationsmethode sowie Fokus der Aufmerksamkeit auf die Bewertung (s. Abschnitt 5-1-4-4).

5-1-4-3 Einfluss der Materialeigenschaften

Wie in Tabelle 5-5 leicht ersichtlich wird, beeinflusst sowohl die Manipulation der Härte, der Textur als auch der Temperatur die Einschätzungen der Probanden signifikant. Auch die Interaktion zwischen Textur und Härte wird statistisch reliabel, die Wechselwirkungen mit dem Faktor Temperatur nicht.

Um den Effekt getrennt für die abhängigen Variablen betrachten zu können, werden die univariaten Analysen in Tabelle 5-6 getrennt für die Bewertung der Nachgiebigkeit, der Körnung sowie der Leitfähigkeit berichtet und im Folgenden einzeln betrachtet.

Wahrnehmung der Nachgiebigkeit. In Tabelle 5-6A sind die Einflüsse der Faktoren Härte, Textur und Temperatur auf die Beurteilung der Nachgiebigkeit zusammengestellt. Den stärksten Effekt zeigt, wie erwartet und bereits in Abschnitt 5-1-4-1 dargestellt, die Variation der Härte. Darüber hinaus beeinflusst jedoch auch eine Variation der Textur signifikant das Empfinden der Nachgiebigkeit: Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass glatte Oberflächen als nachgiebiger und texturierte Oberflächen als weniger nachgiebig eingeschätzt werden. Die Interaktion zwischen Oberflächentextur und Objekthärte wird nicht statistisch signifikant. Auch die Variation der Oberflächentemperatur beeinflusst nicht die Beurteilung der Nachgiebigkeit.

Tabelle 5-6 Ergebnisse der in der MANOVA signifikant gewordenen Effekte bei Variation der Oberflächentextur, -temperatur sowie Objekthärte für die Beurteilung der Nachgiebigkeit (A), Körnung (B) sowie Leitfähigkeit (C). Alle mit (*) gekennzeichneten F-Statistiken wurden mit der Greenhouse-Geisser Korrektur korrigiert.

	A) Nachgiebigkeit			B) Körnung			C) Leitfähigkeit		
	F(df)	p	η^2	F(df)	p	η^2	F(df)	p	η^2
HE Härte	982.72 (1,28)	< 0.01	0.972	11.22 (1,28)	< 0.01	0.286	0.33 (1,28)	0.570	0.023
HE Textur	14.42 (1,28)	< 0.01	0.340	587.86 (1,28)	< 0.01	0.955	0.12 (1,28)	0.734	0.004
HE Temperatur	2.81 (2,56)	0.068	0.091	3.02 (1.7,47.8)*	0.066	0.097	81.58 (2,56)	< 0.01	0.744
WW Textur x Härte	0.00 (1,28)	0.997	0.000	32.25 (1,28)	< 0.01	0.535	0.01 (1,28)	0.921	0.000

Wahrnehmung der Körnung. Den stärksten Einfluss auf die Einschätzung der Ausprägungsstärke der Körnung übt, wie schon im Abschnitt 5-1-4-1 dargestellt, eine Variation der Oberflächentextur aus (s. Tabelle 5-6B). Auch eine Variation der Objekthärte, jedoch stärker die Interaktion zwischen Objekthärte und Oberflächentextur, resultiert in einem unterschiedlichen Bewertungsverhalten: Harte Objekte werden als weniger gekörnt und weiche Objekte als stärker gekörnt eingeschätzt (Haupteffekt Textur).

Zur Veranschaulichung der Interaktion wurde die eingeschätzte Ausprägungsstärke der Oberflächenkörnung getrennt für texturierte und glatte Oberflächen gegen die Objekthärte abgetragen (s. Abbildung 5-4): Besonders bei tatsächlich texturierter Oberfläche wirkt sich der Einfluss der Objekthärte auf die Bewertung aus.

Wahrnehmung der Leitfähigkeit. Kein anderer Effekt als die Variation der Oberflächentemperatur beeinflusst die Einschätzung der Stärke wahrgenommener Leitfähigkeit (s. Abschnitt zur Kontrolle der experimentellen Variation).

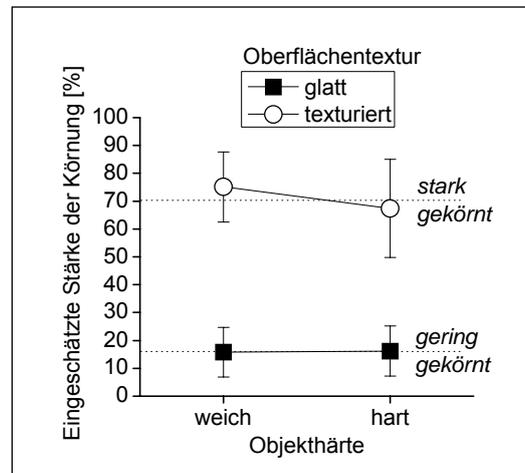


Abb. 5-4 Interaktion zwischen dargestellter Oberflächentextur und Objekthärte auf die eingeschätzte Ausprägungsstärke der Oberflächenkörnung.

5-1-4-4 Einfluss des Aufmerksamkeitsfokus' sowie der Explorationsbewegung

In der multivariaten Analyse (s. Tabelle 5-5) wird ersichtlich, dass weder die Anzahl der zu beachtenden Materialeigenschaften (Fokus der Aufmerksamkeit) noch die Interaktion mit der Explorationsmethode die Beurteilungen der Probanden beeinflussen. Stattdessen sind zwei unerwartete Interaktionen mit der gewählten Explorationsmethode signifikant: Die Ergebnisse für die univariaten Varianzanalysen wurden zusammen mit dem Haupteffekt der Exploration in Tabelle 5-7 zusammengestellt.

Tabelle 5-7 Ergebnisse der in der MANOVA signifikant gewordenen Effekte bei Variation der Explorationsmethode für die Beurteilung der Nachgiebigkeit (A), Körnung (B) sowie Leitfähigkeit (C). Mit (*) gekennzeichnete Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	A) Nachgiebigkeit			B) Körnung			C) Leitfähigkeit		
	F(df)	p	η^2	F(df)	p	η^2	F(df)	p	η^2
HE Exploration	3.43 (1,28)	0.075	0.109	6.05 (1,28)	0.020	0.178	12.27 (1,28)	< 0.01	0.305
WW Härte x Exploration	4.58 (1,28)	0.041	0.140	13.34 (1,28)	< 0.01	0.323	6.17 (1,28)	0.019	0.181
WW Temperatur x Exploration	0.67 (2,56)	0.514	0.023	0.66 (1.7,47.8)*	0.500	0.023	9.44 (2,56)	< 0.01	0.252

Die Wahl der Explorationsmethode, d.h. ob mit den drei adäquaten Bewegungen sequentiell oder allein durch Ausüben von Druck die Materialeigenschaften untersucht werden, beeinflusst die Beurteilung der Nachgiebigkeit nicht. Der Einfluss auf die eingeschätzte Ausprägungsstärke der Körnung wird nur auf dem 5%-Signifikanzniveau statistisch signifikant.

Allein die Beurteilung der Ausprägungsstärke thermischer Leitfähigkeit wird statistisch signifikant von der gewählten Explorationsmethode beeinflusst (s. Abbildung 5-5A); darüber hinaus wird auch die Interaktion mit der tatsächlichen Pin-Temperatur signifikant. Thermische Leitfähigkeit wird als höher beurteilt, wenn die Materialeigenschaften allein durch Ausüben von Druck untersucht werden; dieser Effekt trifft jedoch nur bei einer Pin-Temperatur von 20°C ($F(1,28)=8.72$, $p<0.01$; $\eta^2=0.237$) sowie für 37°C ($F(1,28)=15.05$, $p<0.01$; $\eta^2=0.350$) zu.

Bei einer Pin-Temperatur von 32°C scheint der Zusammenhang eher umgekehrt, wird jedoch nicht statistisch signifikant ($F(1,28)=4.36$, $p=0.048$).

Auch die Interaktion zwischen Explorationsbewegung und Härte des Objektes wird statistisch signifikant. Wie Tabelle 5-7 entnommen werden kann, wird die Empfindungsstärke der Oberflächenkörnung in Abhängigkeit der Explorationsmethode und Objekthärte beeinflusst. Dabei ist dieser Einfluss, wie in Abbildung 5-5B ersichtlich wird, ausschließlich bei harten Objekten gegeben: Wird mit nur einer spezifischen Explorationsmethode exploriert (Ausüben von Druck), so wird die die Oberflächenkörnung als geringer eingestuft. Um den Einfluss getrennt für die beiden Explorationsmethoden zu erheben, werden zwei ANOVAs gerechnet. Variationen in der Objekthärte beeinflussen die Einschätzung der Oberflächenkörnung nur signifikant, wenn mit einer Explorationsmethode untersucht wird ($F(1,14)=43.80$, $p<0.01$; $\eta^2=0.758$); auch die Interaktion zwischen Textur und Härte wird bei Verwendung nur einer Explorationsmethode, nämlich Ausüben von Druck, signifikant ($F(1,14)=26.51$, $p<0.01$; $\eta^2=0.654$); beide Effekte entsprechen der in Abschnitt 5-1-4-3 erläuterten Richtung. Wird jedoch mit drei spezifischen Explorationsmethoden sequentiell untersucht, kann weder der Haupteffekt Härte ($F(1,14)=0.032$, $p=0.860$) noch die Interaktion zwischen Härte und Textur ($F(1,14)=7.3$, $p=0.017$) auf die Wahrnehmung der Oberflächenkörnung nachgewiesen werden. Damit verschwindet also der Einfluss von Variationen in der Objekthärte auf die Empfindungsstärke der Oberflächenkörnung bei erzwungener serieller Verarbeitung; der Einfluss von Variationen der Oberflächentextur auf die Objektnachgiebigkeit bleibt jedoch bestehen.

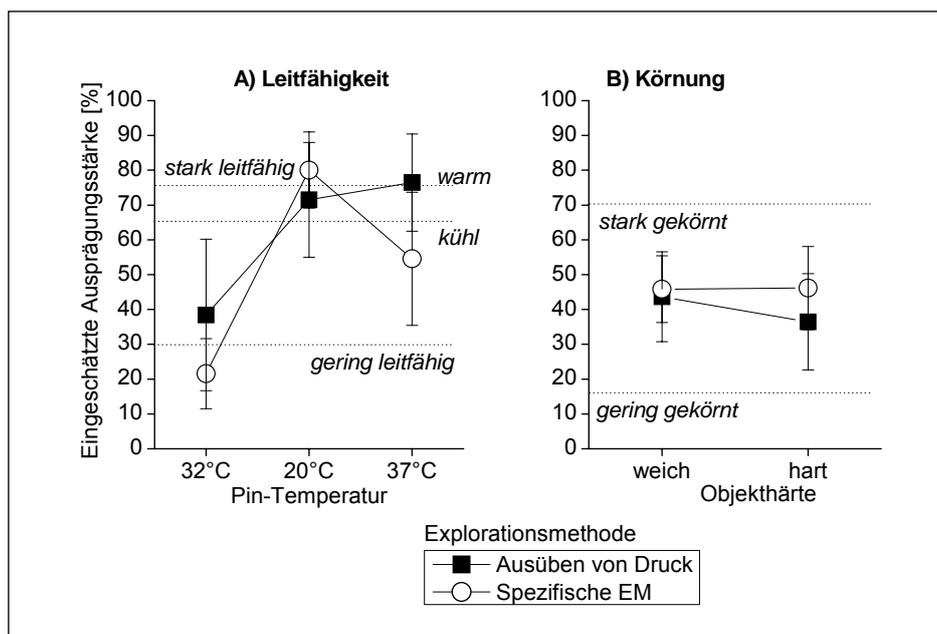


Abb. 5-5 Relevante Wechselwirkungen mit dem Faktor Explorationsmethode: A) Interaktion mit Pin-Temperatur auf die wahrgenommene Ausprägungsstärke der Oberflächenleitfähigkeit sowie B) Interaktion mit Objekthärte auf die eingeschätzte Ausprägungsstärke von Oberflächenkörnung.

5-1-5 Zusammenfassung

Wie unterschiedliche Materialeigenschaften gruppiert werden, wenn sie über die Fingerspitze aufgenommen werden und ob haptische Illusionen bei der Gruppierung auftreten, wurde an einem eigens für diesen Zweck konstruierten Pin-Display untersucht. Mit dem vorgestellten

Instrumentarium wurde ein flexibles aufwandminimiertes experimentelles Werkzeug geschaffen, das aufgrund der vielfältigen Variationsmöglichkeiten Beispielcharakter hat (vgl. Kammermeier, 2004). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-8 zusammengestellt.

In Anlehnung an die Literatur waren besonders zwei Einflüsse erwartet worden (Hypothese V-1): A) thermische Intensivierung (vgl. Stevens, 1991) sowie B) bidirektionale Integration von Textur und Härte (vgl. Lederman & Klatzky, 1993). Letztere besagt, dass eine Veränderung der Oberflächentextur die Wahrnehmung der dargestellten Objektnachgiebigkeit, wie umgekehrt auch eine Veränderung der Objekthärte die Wahrnehmung der umgesetzten Oberflächenkörnung beeinflussen sollte: Diese sog. bidirektionale Integration konnte bestätigt werden (s. auch Tabelle 5-8). Die Ergebnisse stehen somit in Übereinstimmung mit der Literatur (z.B. Klatzky et al., 1989). Thermische Intensivierung hingegen konnte nicht nachgewiesen werden, d.h. eine Veränderung der Pin-Temperatur führte nicht zu einer Erhöhung der Empfindungsstärke der Oberflächenkörnung oder der Objektnachgiebigkeit (entgegen den Ergebnissen der Literatur, s. z.B. Stevens, 1991). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in dieser Untersuchung kalte Objekte nicht mit 0°C umgesetzt wurden, sondern, um eine höhere Ähnlichkeit zu realen Materialien (Metalle) zu erhalten, mit 23°C.

Tabelle 5-8 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock V „Wahrnehmung von Materialeigenschaften“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
V-1 Jede Materialeigenschaft beeinflusst die Wahrnehmung (resp. die Empfindungsstärke) der anderen, i. Sinne von... ... A) thermische Intensivierung,	n. bestätigt	
... B) bidirektionale Integration von Textur und Härte	bestätigt	$\eta^2=0.34$ (Textur beeinflusst Nachgiebigkeitsbewertung); $\eta^2=0.29$ (Härte beeinflusst Bewertung der Körnung)
V-2 Jede Materialeigenschaft beeinflusst die Empfindungsstärke der anderen in Abhängigkeit von deren Ausprägung	teilweise bestätigt	$\eta^2=0.54$ (Textur und Härte beeinflussen die Bewertung der Körnung)
V-3 Die Variation zweier Materialeigenschaften beeinflusst die Einschätzung der Ausprägungsstärke der dritten Materialeigenschaft	n. bestätigt	
V-4 Die Wahrnehmung (resp. Empfindungsstärke) der explorierten Materialeigenschaften wird von der Explorationsmethode beeinflusst	teilweise bestätigt	$\eta^2=0.31$ (Bewertung der Leitfähigkeit)
V-5 Eine Reduzierung des Aufmerksamkeitsfokus führt zu einer reduzierten Aufmerksamkeit gegenüber der einzelnen Materialeigenschaften	n. bestätigt	
V-6 Die Veränderung der Wahrnehmung sollte zwischen einem breiten Aufmerksamkeitsfokus bei sequentieller Verwendung der Explorationsmethoden im Vergleich zu einem schmalen Fokus bei reinem Kontakt am stärksten auftreten	n. bestätigt	

Darüber hinaus wurde erwartet, dass eine Interaktion zwischen zwei Materialeigenschaften die wahrgenommene Ausprägung der jeweils anderen beeinflussen sollte (Hypothese V-2): Diese Interaktion konnte nur in einem Fall nachgewiesen werden. Variation von Oberflächen-textur und Objekthärte führte zu einer veränderten Wahrnehmung der Oberflächenkörnung (s. auch Tabelle 5-9): Der Einfluss der Objekthärte – harte Objekte werden als weniger gekörnt und weiche Objekte als gekörnter eingeschätzt – zeigt sich besonders bei texturierten Oberflächen, während bei glatter Oberfläche eine Variation der Objekthärte die wahrgenom-

mene Ausprägungsstärke nicht beeinflusst.

Obwohl darüber hinaus ein Einfluss der Explorationsart (Hypothese V-4) auf die Wahrnehmung der einzelnen Materialeigenschaften erwartet worden war, lassen sich diese Hypothesen mit einer Ausnahme nicht bestätigen. Es zeigt sich ein Einfluss der Explorationsmethode auf die Wahrnehmung der Leitfähigkeit: Die Wahrnehmung von Leitfähigkeit ist stärker, wenn allein durch Ausüben von Druck exploriert wird; dies gilt nur für hoch leitfähige Materialien (Pin-Temperatur bei 20°C oder 37°C). Dieser Effekt lässt sich auf temporale Summation sowie die Reizweiterleitungsgeschwindigkeit thermischer Reize zurückführen (vgl. Abschnitt 2-5): Im Vergleich zum sequentiellen Explorieren ist die Kontaktzeit bei Verwendung nur einer Explorationsprozedur höher. Dies wiederum führt zu einer besseren Informationsaufnahme und somit einer prominenteren Wahrnehmung thermischer Reize. Ein weiterer Grund könnte in der Umsetzung der Temperatur zu finden sein: In der Literatur wurden „kalte“ Objekte durch Kühlung auf 0°C hergestellt (s. Abschnitt 5-1-1). In den berichteten Untersuchungen wurde die Möglichkeit der Assoziation mit bestehenden Materialien für wichtiger erachtet und somit eine höhere Grundtemperatur ausgewählt.

Auch beeinflusst eine Variation der Objekthärte die Wahrnehmung der Oberflächenkörnung stärker, wenn allein durch Ausüben von Druck exploriert wird. Dies bedeutet, dass bei nichtserieller Verarbeitung (d.h. präattentativ) die haptische Textur-Härte-Illusion bidirektional stärker ausgeprägt ist. Wird jedoch seriell nach Verknüpfungen gesucht, bleibt lediglich die Beeinflussung von Variationen der Oberflächentextur auf die wahrgenommene Ausprägungsstärke der Objektnachgiebigkeit bestehen.

Weder Aufmerksamkeitsfokus noch zusätzliche Variation der Explorationsmethoden beeinflusst die Ausprägungsstärke. Das bedeutet, dass die Qualität der Interaktion zwischen Textur und Härte bei der Wahrnehmung der Objektnachgiebigkeit unbeeinflusst ist von der Variation des Aufmerksamkeitsfokus. Das Hinzufügen von Oberflächentextur resultiert demzufolge stabil (und auch unabhängig von der verwendeten Explorationsmethode) in der Illusion höherer Nachgiebigkeit glatter Objekte und geringerer Nachgiebigkeit härterer Objekte.

Zusammengenommen mit den in Abschnitt 4-3 gefundenen Ergebnissen, die zeigten, dass zusätzliche Oberflächentextur weder das Auflösungsvermögen beeinträchtigt noch zu einer erhöhten Kraftaufwenden beim Explorieren führte, erlaubt das zusätzliche Rückmelden von Oberflächentextur das Verstärken der Wahrnehmung von Härte. Dies kann bei der Gestaltung gewinnbringend umgesetzt werden, wenn beispielsweise geringe Nachgiebigkeit (hohe Steifigkeit) schwer zu implementieren ist.

5-2 Informationsintegration über drei Finger

„Interest in the formation of spatial representations from sparse, kinesthetically sensed contacts has been motivated both from a basic research perspective [...] and more recently, by the emergence of force-feedback devices that create virtual haptic environments. [...] The forces delivered to each finger simulate, however, only a single-point contact with the environment at any time. Under these circumstances, people can extract size and shape features”.

(Klatzky & Lederman, 2003, p. 310)

5-2-1 Theoretischer Hintergrund

In Kapitel 1 wurde bereits auf die allgemeine Struktur von TPTA- bzw. Mensch-Roboter-Systemen eingegangen: Menschen können über visuelle Ausgabegeräte, wie z.B. einen Bildschirm, sowie über haptische Ein-/Ausgabegeräte einen Roboter in einer entfernten Umgebung steuern und Informationen über die Interaktion des Roboters mit der entfernten Umgebung zurückgemeldet erhalten (z.B. Buss & Schmidt, 1999). Haptische Informationen werden typischerweise über das haptische Interface entweder durch Kraft- oder durch (zumeist vibro-) taktiles Feedback rückgemeldet, wenige Mensch-Maschine-Schnittstellen erlauben die Darstellung von sowohl Kraft- als auch taktile Information (vgl. Kron & Schmidt, 2005; Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant & Robles-De-La-Torre, 2004; Kammermeier et al., 2004; Lindemann, 2003).

Kraftfeedback kann einerseits Punktinteraktion wie über das PHANTOM® Device (SensAble Technologies, Inc., USA; s. Abschnitt 7-2), Greifbewegungen mit zwei Fingern (vgl. Abschnitt 7-1) oder auch mehrfingrige Interaktion ermöglichen, wie beispielsweise über das CyberGrasp™ Exoskelett (Immersion Corp., s. Abbildung 5-6). Besonders bei komplexeren Aufgaben kann mehrfingrige Rückmeldung von Vorteil sein (z.B. Petzold, et al., 2004; McLaughlin, Sukhatme, Peng, Zhu & Parks, 2003; Turner, Gomez, Tremblay & Cutkosky, 1998).

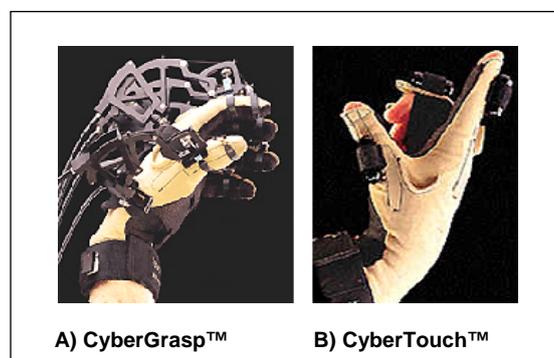


Abb. 5-6 Zur Vermittlung von A) Kraftinformationen über Bowdenzüge das kommerziell erhältliche CyberGrasp™ Exoskelett (Immersion Corp., USA) und B) von vibrotaktilem Feedback durch Vibrationsmotoren der sog. CyberTouch™ (Immersion Corp.; USA). Beide Komponenten können kombiniert verwendet werden.

Taktiler Feedback wird meist über Vibrationsmotoren oder Pin-Displays umgesetzt (z.B. Hayward et al., 2004; Lindeman & Templeman, 2001; Burdea, 1996). Auch taktile Informationen allein können (mehrfingrig) ausreichend Informationen über den Kontakt oder das Manipulieren mit einem entfernten (oder virtuell generierten) Objekt geben (vgl. Murray, Klatzky & Khosla, 2003).

Werden demzufolge über haptische Ein-/Ausgabegeräte Informationen verteilt an mehrere Finger – oder auch getrennt auf beide Hände – dargeboten (vgl. Deml, 2004; Kammermeier, 2004), müssen diese oft abstrakten Informationen kombiniert und mental so repräsentiert werden, dass das Dargestellte wahrgenommen wird und somit auch eine Einschätzung metrischer Relationen erlaubt (z.B. Klatzky & Lederman, 2003b). Informationen über mehrere Finger können zu einer kohärenten Repräsentation des berührten Objekts integriert werden (z.B. Pont et al., 1999), wobei zu große Variationen des Fingerabstands bei der Exploration zu einer Reduzierung der Genauigkeit führen (vgl. Hollins, 2002; Pont et al., 1999; Craig & Cian, 1997).

Offene Fragestellungen. Im Allgemeinen wird Multimodalität als ein bedeutender Faktor für das Präsenzerleben angesehen (vgl. Hecht et al., 2006; Deml, 2004; Sadowski & Stanney, 2002; Witmer & Singer, 1998). Als eine wesentliche Komponente gilt hierbei zumeist die Qualität der Mensch-Roboter-Schnittstelle (z.B. IJsselstein et al., 2000; Mantovani & Riva, 1999; Stanney et al., 1998; Lombard & Ditton, 1997). Es kann jedoch nicht nur die Anzahl zurückgemeldeter Modalitäten, wie Sicht, Haptik und Audio, variiert werden; vielmehr kann auch innerhalb einer Modalität Informationen unterschiedlich umgesetzt werden, indem mehr als eine Submodalität (z.B. Kraft- und Vibrationswahrnehmung) angesprochen wird. Inwiefern sich eine Erhöhung der Informationsmenge (vibrotaktile mit bzw. ohne zusätzliche Kraftrückmeldung) auf das Präsenzerleben und zusätzlich die Qualitätsbeurteilung des haptischen Interface auswirken, wird im Folgenden untersucht.

Hypothese VI-1: Zusätzliche Krafrückmeldung erhöht das Präsenzerleben und die Beurteilung der Qualität des haptischen Interface.

Darüber hinaus wird zum einen in der Literatur oft ein Zusammenhang zwischen der Leistung, die der Proband bei der Bewältigung einer Aufgabe über das haptische Interface erzielen kann (Performanz oder Aufgabenleistung), und dem Präsenzerleben angenommen (vgl. Draper et al., 1998; Barfield et al., 1995; Sheridan, 1996; Steuer, 1992;). Das Erhöhen der Informationsmenge sollte demzufolge auch in einer verbesserten Performanz resultieren. Darüber hinaus zeigen auch andere Untersuchungen, dass sich zusätzliche Krafrückmeldung auf die Genauigkeit haptischer Wahrnehmung (im Gegensatz dazu negativ) auswirken kann (vgl. Clark & Horch, 1986; Rymer & D'Almeida, 1980; Howard & Anstis, 1974). Es wird also erwartet, dass eine Erhöhung der Informationsmenge (vibrotaktile vs. Kraft- und vibrotaktile Information) ebenfalls einen Einfluss auf die Performanz hat.

Hypothese VI-2: Zusätzliche Krafrückmeldung beeinflusst die Performanz.

Über ein haptisches Interface können in der Regel sehr komplexe Interaktionen mit der entfernten (oder auch virtuell generierten) Umgebung stattfinden. Um jedoch die Performanz der Probanden kontrolliert untersuchen zu können, wird auf eine telepräsenze Umsetzung verzichtet, um wie in Kapitel 1 ausgeführt, eine zusätzliche Einführung von Systemlatenzen zu unterbinden.

In Abschnitt 2-5-1 war bereits ausführlich erläutert worden, dass über mehrere Finger Informationen über die Form eines Objektes wahrgenommen werden können (vgl. Pont et al., 1999); auch metrische Beziehungen können rekonstruiert werden (vgl. Klatzky & Lederman, 2003b). Dabei ist diese Rekonstruktion des haptischen Raums Verzerrungen unterlegen; ein bereits in Abschnitt 4-3 am Beispiel der Diskriminierungsfähigkeit untersuchtes Phänomen ist

in diesem Zusammenhang der Oblique-Effekt. Auch Oblique-Effekte der Klasse 2 können stabil nachgewiesen werden: Sie entstehen aufgrund beteiligter kognitiver Prozesse. Wird demzufolge die zuvor explorierte Orientierung des Balkens (relativ zur Horizontalen) reproduziert, erfolgt ein Abruf des Wahrgenommenen aus dem Gedächtnis; dies wiederum initiiert rezeptuelle Prozesse (z.B. Kerst & Howard, 1978). Effekte der Klasse 2 resultieren in einer reduzierten Genauigkeit aufgrund der Involvierung kognitiver Einflüsse (vgl. Klatzky & Lederman, 2003b). Dieser haptische Oblique-Effekt wurde mehrfach nachgewiesen (z.B. Gentaz et al., 2001; Fassé, Hogen, Kay & Mussa-Ivaldi, 2000; Gentaz & Hatwell, 1996, 1995; Hogan et al., 1990; Lechelt & Verenka, 1980).

Wird über ein mehrfingeriges haptisches Interface die Neigung von Ebenen exploriert, sollte die Performanz des Probanden, im Sinne einer Wiedergabe des über das Interface Wahrgenommenen, ebenfalls eine richtungsabhängige Beeinflussung aufweisen.

Hypothese VI-3: Die Genauigkeit der Neigungseinschätzung ist abhängig von der dargebotenen Neigung (gegenüber einer horizontal orientierten Basis) und nimmt mit zunehmender Neigung zu: Dabei zeigt sich eine höhere Genauigkeit um die Hauptachse.

Der haptische Oblique-Effekt (Klasse 2) wurde jedoch nicht nur bei haptischen Matching-Aufgaben stabil nachgewiesen, sondern auch bei verbaler Einschätzung des Winkels (z.B. Lakatos & Marks, 1998; Proffitt, Bhalla, Gossweiler & Midgett, 1995). Proffitt et al. (1995) wies darüber hinaus sogar eine stärkere Beeinflussung der verbalen Einschätzungen in Abhängigkeit der aktuellen Neigung nach. Es wird daher erwartet, dass sich ein Unterschied bezüglich der Methode auch bei haptischer Neigungswahrnehmung reproduzieren lässt (vgl. auch Zuidhoek, Kappers & Postma, 2007).

Hypothese VI-4: Die Antwortart bei der Einschätzung der Neigung beeinflusst die Genauigkeit: Haptisches Reproduzieren der wahrgenommenen Neigung unterscheidet sich von der verbalen Einschätzung.

5-2-2 Das haptische Interface

Das haptische Interface bestand lediglich aus einem haptischen Ein-/Ausgabegerät, da keinerlei visuelle Rückmeldung über die Neigung der Ebenen gegeben werden sollte, und setzte sich aus drei Teilen zusammen (s. Abbildung 5-7 rechts): Dem kommerziell erhältlichen Exoskelett CyberGrasp (Immersion Corp., USA) sowie drei handelsüblichen Vibrationsmotoren (Durchmesser 4 mm) als Aktuatoren. Das CyberGrasp Exoskelett kann Kräfte (maximal 12 N) auf die einzelnen Finger ausüben, indem durch Bowdenzüge die Finger Richtung Handrücken gezogen werden; diese Greifkräfte werden über zahlreiche Gelenke produziert und können für jeden der fünf Aktuatoren (und damit für jeden Finger) getrennt programmiert werden.

Als Sensoren dienten drei Linearpotenziometer mit einem Messbereich von 100 mm und einer Auflösung von ≥ 1 mm. Diese Positionssensoren wurden fest mit einem Display verschraubt (vgl. dazu auch Hollins, 2002; Pont, Kappers & Koenderink, 1999; Craig & Quian, 1997); die Abstände zwischen Zeige- und Mittelfinger betragen 36 mm und zwischen Mittel- und Ringfinger 32 mm. An ihrer Spitze wurden Schalen aus hartem Plastik befestigt, in die die Vibrationsmotoren eingebettet waren, und die durch ihre Form der Fingerspitze angepasst waren. Die Finger wurden zusätzlich mit einem elastischen Band an die Schalen fixiert, um dauerhaften physikalischen Kontakt zwischen Fingerspitze und Vibrationsmotoren sicherzustellen.

Eine Armstütze gewährleistete, dass der Handballen während der Testung unbewegt blieb und sich nur die Finger bewegen konnten. Dabei wurde der CyberGrasp so befestigt und die Hand auf der Armstütze dergestalt abgelegt, dass eine Fingerbewegung allein über das 3. Fingergelenk (metacarpophalangeales Gelenk) möglich war.

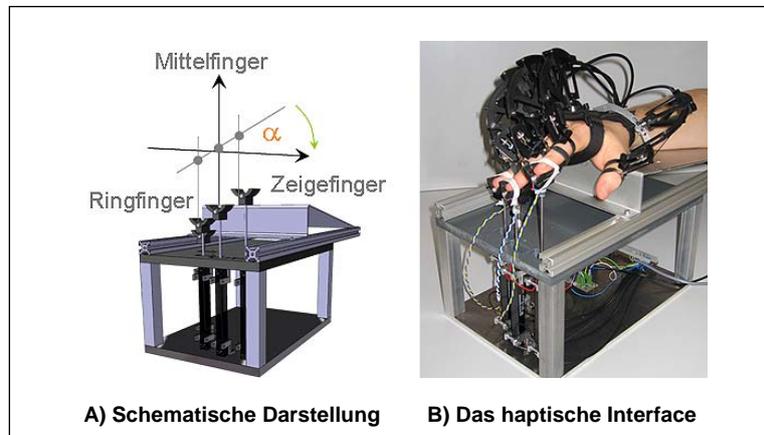


Abb. 5-7 Mensch-Maschine-Schnittstelle mit Krafrückmeldung durch das Exoskelett sowie Vibrationsmotoren, die auf den Positionssensoren angebracht wurden: A) Schematische Darstellung der Positionierung der Finger sowie der Umsetzung der Ebenenneigung und B) das haptische Interface während eines Experimentaldurchgangs.

Die aktuelle Fingerposition y wurde mit einer Abtastrate von 1 kHz gemessen (s. Abbildung 5-8). Sobald der Target-Finger (in Abhängigkeit der Neigung der definierten Ebene) sich innerhalb eines festgelegten Intervalls Δ befand (genaue Spezifikationen s. Abschnitt 5-2-3 und 5-2-4), konnte

- a. vibrotaktilen Feedback ω_v mit einer konstanten Frequenz von 40 Hz oder
- b. zusätzlich auch Krafffeedback f_p ausgegeben werden.

Kraftinformation wurde als konstante Kraft (K_{const}) mit 6 N oder als Federkraft (K_{Feder}) mit 1.2 N/mm implementiert.

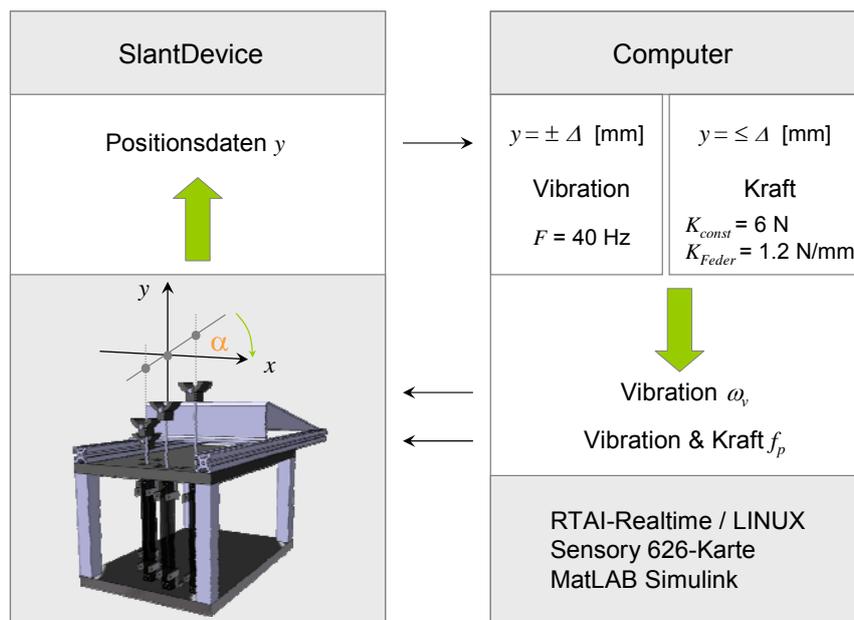


Abb. 5-8 Mensch-Maschine-Schnittstelle und Realzeit-Verarbeitungseinheit: Positionsdaten werden gemessen und Vibrations- oder Kraft- und Vibrationsrückmeldung gegeben

5-2-3 Experimentalblock VI – Wahrnehmung von Oberflächenneigung

5-2-3-1 Methode

Stimuli. Die Neigung der Ebenen wurde, wie in Abschnitt 5-2-2 dargestellt, als Neigung in Richtung Ringfinger (nach rechts) relativ zur horizontalen Ebene dargestellt (s. Abbildung 5-7): Den höchsten Punkt der Ebene beschrieb demzufolge stets der Zeigefinger. Aufgrund des Bewegungsranges der Finger konnten Neigungen von maximal 37° dargestellt werden; es wurden acht Werte realisiert: 0° , 5° , 10° , 15° , 20° und 35° .

Alle geneigten Ebenen wurden den Probanden ausschließlich haptisch über das in Abschnitt 5-2-2 vorgestellte haptische Interface präsentiert, wobei die Neigung der virtuell generierten Ebene entweder nur vibrotaktil oder vibrotaktil mit zusätzlicher Krafrückmeldung durch das Exoskelett dargestellt wurde. Sobald also der Proband mit den Fingern die zuvor definierte Position (in Abhängigkeit der Neigung der Fläche 0° - 35°) in einem Intervall von $\Delta = \pm 5$ mm erreichte, wurde vibrotaktil Feedback mit einer konstanten Frequenz von 40 Hz dargestellt. Zusätzliches Kraffeedback wurde in einem Intervall $\Delta \leq 5$ mm über der definierten Position gegeben. Dabei wurde die Kraftinformation entweder, wie in Abschnitt 5-2-2 dargestellt, als konstante Kraft ($K_{const} = 6$ N) oder als Federkraft ($K_{Feder} = 1.2$ N/mm) definiert und an jedem der drei Finger ausgegeben.

Versuchsaufbau. In Abschnitt 5-2-2 wurde das haptische Interface ausführlich dargestellt; es diente als Experimentalumgebung, über die die Stimuli, Ebenen unterschiedlicher Neigung, über unterschiedliches Feedback (Vibration, Vibration mit Kraft) ausgegeben wurden. Der Arm des Probanden am haptischen Interface war so positioniert, dass sie einen Winkel von ca. 90° zum Arbeitsplatz bildete. Die Probanden wurden gebeten, während der Darbietung der Reize die Handfläche auf dem Display abzulegen.

Um den Probanden zu erlauben, eine haptische Einschätzung der wahrgenommenen Neigung zu geben, wurde ein Tilt-Board in Anlehnung an Proffitt et al. (1995) konstruiert (s. Abbildung 5-9A).

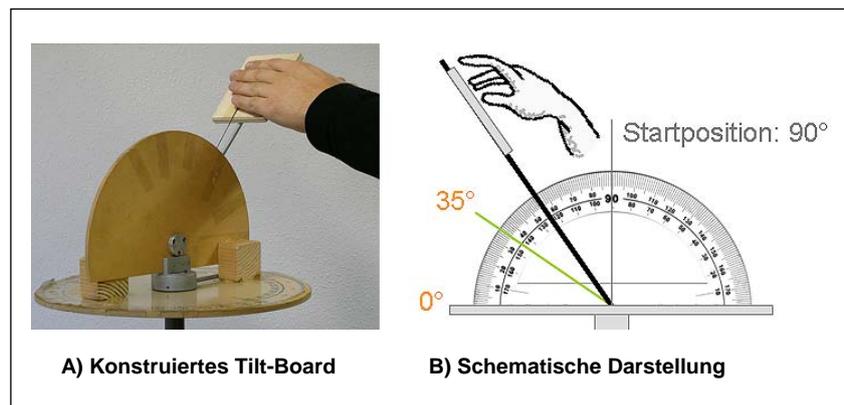


Abb. 5-9 Das Tilt-Board zum (haptischen) Einstellen der über das haptische Interface vermittelten Neigungsinformation: A) Tilt-Board sowie Handhaltung des Probanden (aus Gründen der Veranschaulichung trägt der Proband in diesem Bild kein Exoskelett beim Einstellen). B) Schematische Darstellung des Tilt-Boards.

Das Tilt-Board bestand dabei aus einem Halbkreis mit einer Winkelskala mit 1° -Teilung und einem Wertebereich von -15° bis 195° (s. Abbildung 5-9B) sowie einem bewegbaren Zeiger, auf dessen Ende eine Platte befestigt war. Der Proband legte seine gesamte Handfläche auf die Platte ab und bewegte sie beginnend von 90° zu der von ihm wahrgenommenen Neigung. Readjustierung, wenn er sich über die subjektive Horizontale bewegt hatte, war er-

laubt. Um die Oberflächenneigung über das Tilt-Board einzustellen, wurde der Proband gebeten, die Neigung der Platte durch Neigung des Handgelenks anzupassen¹⁹. Auf eine haptische Einschätzung durch die nicht-dominante Hand wurde verzichtet, da der Transfer von einer auf die andere Hand zusätzlich zu einer erhöhten Fehlerrate führt (vgl. Kappers, 2004, 2002, 1999; Appelle & Countryman, 1986).

Das Tilt-Board befand sich auf Höhe des haptischen Interface', so dass sich der Proband lediglich um 45° drehen musste, um seine haptische Neigungseinschätzung abgeben zu können.

Während des gesamten Experiments wurden visuelle Reize durch das Tragen einer Schlafmaske unterbunden. Über geschlossene Kopfhörer wurde den Probanden, um auditive Reize der Vibrationsmotoren zu reduzieren, Rosa-Rauschen dargeboten.

Präsenzempfinden und Qualität der Schnittstelle

A1) Qualität der dargestellten Neigung (während der Testung)

Bitte bewerten Sie die Qualität der dargestellten Neigung!

1 ----- 10
sehr schlecht sehr gut

A2) Qualität der Schnittstelle (am Ende getrennt für beide Feedbackarten ausgefüllt)

Fragen nach Scheuchenspflug (2001) mit 7-stufiger Antwortskala:

- „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit ihrer Umgebung?“
- „Wie stark fühlten Sie sich in die virtuelle Umgebung versetzt?“ sowie
- „Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?“

1	2	3	4	5	6	7
sehr gering						sehr hoch

B) Präferenzrating

Unter welcher Darstellungsart fiel es Ihnen leichter, die Neigung der Ebene wahrzunehmen?

-3	-2	-1	0	1	2	3
Vibration allein besser						Vibration und Krafrückmeldung besser

Abb. 5-10 Fragen zur Erhebung der wahrgenommenen Qualität der Schnittstelle im Anschluss an jede Präsentation der Neigung über das haptische Interface (A) sowie am Ende über einen Fragebogen, der getrennt für beide Feedbackarten ausgefüllt werden sollte (B). Über eine gepolte Skala konnten die Probanden zusätzlich noch ihre Präferenz angeben (C).

Versuchsdesign. Um die Fragestellungen zu beantworten ist eine Umsetzung von vibrotaktilen ohne sowie mit zusätzlichem Kraftfeedback nötig. Dieser Faktor, im Folgenden mit *Erhöhung der Informationsmenge* bezeichnet, wurde als Innersubjektfaktor umgesetzt. *Art der zusätzlichen Krafrückmeldung* über das CyberGrasp Exoskelett, d.h. konstante (Gruppe KK) vs. Federkraft (Gruppe KF), wurde als Gruppenfaktor festgelegt. Alle acht verschiedenen *Ebenenneigungen* (Variationen zwischen 0 und 35°) wurden wiederum jedem Probanden dargeboten. Insgesamt 16 Reizbedingungen (8 Neigungen unter alleinigen vibrotaktilen so-

¹⁹ Die Genauigkeit des metacarpophalangealen Fingergelenks, über dessen Abbiegen die Position der Neigung am haptischen Interface wahrgenommen werden konnte, entspricht der Genauigkeit des Handgelenks (s. Clark, 1992).

wie 8 Neigungen unter zusätzlichem Kräftefeedback) wurden je einmal wiederholt und von jedem Probanden exploriert. Alle 32 Reizbedingungen wurden randomisiert dargeboten.

Als weiterer zusätzlicher Faktor wurde die *Methode der Einschätzung* untersucht: Die über das haptische Interface dargestellte Neigung sollte sowohl verbal als auch haptisch im Anschluss an die Exploration der Ebeneneigung eingeschätzt werden. Die Reihenfolge der Abfrage wurde zufällig variiert, so dass jede Antwortmethode einmal an erster Stelle abgefragt wurde. Die haptische Einschätzung erfolgte dabei über das in Abbildung 5-9 dargestellte eigens konstruierte Tilt-Board; die verbale Beurteilung wahrgenommener Neigung wurde über die Angabe einer Winkelgradzahl protokolliert.

Zusätzlich wurde über eine Baseline-Messung erhoben, wie gut die Probanden verbal benannte Winkel haptisch über das Tilt-Board einstellen können. In Anlehnung an Proffitt et al. (1995) wurden auch größere Neigungen herangezogen. Die zehn einzustellenden Neigungen wurden dem Probanden vom Versuchsleiter genannt; acht dieser Neigungen waren die zuvor im Test verwendeten (0° - 35° in 5° -Schritten) sowie zusätzlich 55° und 70° .

Die in Hypothese VI-1 angesprochene Teilkomponente des Präsenzepfindens „Qualität der Schnittstelle“ wurde einmal für die Qualität der dargestellten Neigung während der Testung (s. Abbildung 5-10A) sowie am Ende des Experiments als Qualität der Schnittstelle über 3 Fragen aus dem Präsenzfragebogen nach Scheuchenpflug (2001) für beide Feedbackarten getrennt erhoben (s. Abbildung 5-10B). Zusätzlich, um eine Einschätzung der subjektiven Präferenz des Probanden zu erhalten, wurden die Probanden gebeten, auf einer 7-stufigen gepolten Skala einzuschätzen, unter welche Darstellungsart sie die Neigung leichter wahrnehmen konnten (s. Abbildung 5-10B). Da eine Beeinflussung der Personenvariable *Immersive Tendenz* die Performanz beeinflussen könnte (vgl. Witmer & Singer, 1998), wurde den Probanden der Immersionsfragebogen vorgelegt; der Fragebogen ist eine 11-Item-Subskala aus dem Präsenzfragebogen von Scheuchenpflug (2001) und setzt sich aus zwei Faktoren, emotionale Involvierung und Grad der Involvierung, zusammen (s. Anhang D).

Versuchsablauf. Die Probanden nahmen an einem Tisch Platz, an dem das in Abschnitt 5-2-2 dargestellte haptische Ein-/Ausgabegerät aufgestellt war. Ihnen wurde das Exoskelett angelegt; außerdem wurden die (Zeige-, Mittel-, Ring-) Finger der dominanten Hand mittels eines elastischen Bands auf den Schalen der Positionssensoren so befestigt, dass die Finger leicht herausgenommen und die haptische Einschätzung am Tilt-Board gegeben werden konnte.

Vor Beginn der Testung wurden die Probanden während des Trainings instruiert und mit dem experimentellen Ablauf vertraut gemacht. Für das Training wurden Oberflächenneigungen von 0° , 17° , 23° und 37° unter beiden Rückmeldungsarten dargeboten.

Ein Tonsignal gab den Probanden an, wann sie mit dem Explorieren der dargebotenen Oberflächenneigung beginnen konnten. Die Explorationszeit war unbegrenzt und endete durch eine Mitteilung des Probanden. Die Reizdarbietung wurde beendet und der Proband aufgefordert, den Winkel entweder zuerst haptisch (über das Tilt-Board) und danach verbal, oder zuerst verbal und im Anschluss daran haptisch einzuschätzen. Im Anschluss an die beiden Einschätzungen beurteilten die Probanden die Qualität der dargestellten Neigung auf einer 10-Punkte Skala (s. Abbildung 5-10A). Ein Trial endete damit, dass die Finger des Probanden wieder am haptischen Interface positioniert wurden.

Nach Beendigung aller 32 Reizpräsentationen, erfolgte die Baseline-Messung. Zuletzt füllten die Probanden einen Fragebogen aus, der aus den zusätzlichen Fragen (s. Abbildung 5-10B und C) und dem Immersionsfragebogen (s. Anhang D) bestand.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden geprüft, inwiefern die Personenvariable *Immersive Tendenz* einen Einfluss auf die Daten ausübt.

Als nächstes wurden die Bewertungen zur Beurteilung der Qualität ausgewertet. Der Einfluss der *Informationsmenge* (vibrotaktil vs. vibrotaktil und zusätzliches Kräftefeedback), die *Art*

der *Kraftdarbietung* (konstant vs. Federkraft) sowie die dargestellte Neigung auf das Präsenzerleben (s. Abbildung 5-10A) wurde anhand einer dreifaktoriellen ANOVA geprüft. Welchen Einfluss die *Informationsmenge* und die *Art des Kraftfeedbacks* auf die Einschätzung der Qualität der Neigung hatte, wurde für die drei Fragen (s. Abbildung 5-10B) über eine zweifaktorielle MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) untersucht. Das direkte Präferenzrating (s. Abbildung 5-10C) wurde zuletzt deskriptiv dargestellt; welchen Einfluss die Art des Kraftfeedbacks (konstante oder Federkraft) auf die Präferenz der *Informationsmenge* (vibrotaktile ohne oder mit zusätzlichen Kraftfeedbacks) hat, wurde mit dem Mann-Whitney U-Test geprüft.

Im dritten Teil von Abschnitt 5-2-3-2 wurden die Neigungsseinschätzungen betrachtet. Zuerst wurden die haptischen Einschätzungen der vom Versuchsleiter benannten Neigungen (Baseline-Maß) deskriptiv erörtert, und im Anschluss daran wurde mit einer zweifaktoriellen ANOVA (Gruppenfaktor, benannte Neigung) geprüft, ob die verbalen Neigungen haptisch reproduziert werden konnten.

Als nächstes wurden die verbalen und haptischen Einschätzungen der über das haptische Interface explorierten Ebenenneigung betrachtet. Mit einer ANOVA wurde die experimentelle Variation kontrolliert und demzufolge überprüft, ob sich die Reihenfolge der Methode der Einschätzung (verbal-haptisch, haptisch-verbal) auf die Performanz auswirkte und ob die Probanden die Oberflächenneigungen verbal oder haptisch reproduzieren konnten. Im Anschluss daran wurden die individuellen Fehler (absolut, variabel) berechnet und die Hypothesen mit einer vierfaktoriellen MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) mit Messwiederholung (*Neigung, Informationsmenge, Methode der Einschätzung*) sowie dem Gruppenfaktor *Art des Kraftfeedbacks* geprüft. Signifikante Effekte wurden über zwei Varianzanalysen getrennt für die variablen und absoluten Fehler getestet. Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden jeweils mit der Greenhouse-Geisser Korrektur korrigiert; alle Effekte wurden auf dem 1%-Niveau getestet.

5-2-3-2 Ergebnisse

Stichprobe und Personenvariable.

Stichprobe. Am Experimentalblock VI „Wahrnehmung von Neigung über ein haptisches Interface – Einschätzung der Neigung“ nahmen 30 Studenten und Mitarbeiter der Universität der Bundeswehr München und der Technischen Universität München teil. Alle Probanden waren Rechtshänder. Die Hälfte der Personen (Gruppe KK) erhielten konstantes Kraftfeedback (15 Männer; im Mittel 27 Jahre alt). Kraftinformation wurde als steife Wand für die andere Hälfte (11 Männer, 4 Frauen; im Mittel 23 Jahre alt) dargestellt (Gruppe KF).

Personenvariable. Der Immersionsfragebogen wurde für beide Gruppen getrennt ausgewertet: Gruppe KK erhielt im Mittel einen Punktwert von 22.9 (sd = 4.5) für den Faktor emotionale Involvierung (Gruppe KS: MW = 26.7, sd = 7.4) sowie für den Faktor Grad der Involvierung einen mittleren Punktwert von 20.0 (sd = 6.2; Gruppe KS: MW = 23.1, sd = 4.9). Beide Werte wichen nicht signifikant von der Eichstichprobe ab. Eine einfaktorielle MANOVA zeigte, dass beide Gruppen sich weder bezüglich ihrer emotionalen Involvierung ($F(1,28)=3.13$, $p=0.088$) noch bezüglich ihres Grads der Involvierung ($F(1,28)=2.3$, $p=0.137$) signifikant voneinander unterschieden. Keiner der Faktoren korrelierte signifikant mit den Neigungseinschätzungen. Alle gefundenen Effekte können somit auf die experimentelle Variation zurückgeführt werden.

Beurteilung der Qualität.

Präsenzerleben. Die einzelnen Angaben zu den 3 Fragen (s. Abbildung 5-10B), anhand derer die Probanden bei Testende die allgemeine Qualität der Schnittstelle getrennt für vibrotaktile Darstellung allein sowie vibrotaktile Darstellung mit zusätzlicher Krafrückmeldung bewerteten, sind in Tabelle 5-9 zusammengestellt. Es zeichnet sich ein Trend zur Bevorzugung zusätzlicher Krafrückmeldung ab, wenn die Kraftinformation als Federkraft gerendert wurde.

Tabelle 5-9 Bewertung des Präsenzerlebens in Abhängigkeit der haptischen Informationsmenge (vibrotaktile ohne vs. mit Krafrückmeldung) erfasst über 3 Fragen (s. Abbildung 5-10B) innerhalb beider Experimentalgruppen (KK, KF).

Informationsmenge		konstante Kraft (KK)		Federkraft (KF)	
		MW	sd	MW	sd
Vibration	Frage 1	4.6	1.7	4.1	1.3
	Frage 2	4.8	1.4	4.4	1.4
	Frage 3	4.1	1.7	4.2	1.0
Vibration und zusätzliche Krafrückmeldung	Frage 1	4.6	1.4	4.9	1.0
	Frage 2	4.8	1.5	5.3	1.2
	Frage 3	4.0	1.6	4.5	1.2

Die MANOVA zeigt jedoch weder einen signifikanten Haupteffekt Informationsmenge ($F(3,26)=1.80$, $p=0.172$), noch eine signifikante Interaktion ($F(3,26)=0.19$, $p=0.193$). Auch beeinflusst eine Variation der Kraftdarstellung nicht die Angaben der Probanden bezüglich der Frage 1 ($F(1,28)=0.06$, $p=0.811$), Frage 2 ($F(1,28)=0.01$, $p=0.944$) oder Frage 3 ($F(1,28)=0.34$, $p=0.564$).

Qualität der dargestellten Neigung. Im Anschluss an jede Darbietung einer Ebenenneigung über das haptische Interface bewerten die Probanden auch die Qualität der dargestellten Neigung auf einer 10-stufigen Skala (s. Abbildung 5-10A). Im Schnitt beurteilte die Gruppe KK die Qualität bei rein vibrotaktile Rückmeldung mit 7.1 ($sd = 1.6$) und bei zusätzlicher propriozeptiver Rückmeldung mit 7.3 ($sd = 1.3$), während Gruppe KF die Güte rein vibrotaktile Darstellung mit 7.2 ($sd = 1.4$), und mit 7.4 ($sd = 1.3$) beurteilte, wenn zusätzlich propriozeptive Rückmeldung gegeben wird. Im Allgemeinen zeichnet sich also kein Unterschied bzgl. der Rückmeldungsarten ab: Die Probanden schätzen die Qualität als eher hoch ein (ca. 7 Punkte von 10).

Weder die Informationsmenge ($F(1,28)=3.264$, $p=0.082$), noch die Art der Kraftdarstellung ($F(1,28)=0.13$, $p=0.720$) oder die Interaktion (WW Informationsmenge x Kraftdarstellung: $F(1,28)=0.003$, $p=0.958$) beeinflusste die Beurteilung der Qualität. Den einzig signifikanten Einfluss auf die Qualitätsbeurteilung übte die tatsächlich dargestellte Neigung aus (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(4,122)=4.112$, $p<0.01$; $\eta^2=0.13$): Mit zunehmender Neigung reduziert sich die eingeschätzte Güte der Darstellung; der Effekt ist jedoch zu vernachlässigen.

Präferenzrating. Zuletzt hatten die Probanden die Möglichkeit auf einer 7-stufigen Skala von „-3“ (Vibrationen) bis „+3“ (Vibrationen und Kraft) direkt anzugeben, welche der beiden Rückmeldungsarten sie bevorzugten. Der Median in Gruppe KK lag bei „-1“; der Interquartilabstand bei „-2“ und „+2“, während der Median in Gruppe KF bei „+2“ lag und der Interquartilabstand bei „+2“ und „+3“ (nur zwei Personen bewerteten die Schnittstelle mit „-2“ und „0“ für „weder noch“). Der Unterschied wird statistisch signifikant ($U=52.0$, $p<0.05$), d.h. wird zusätzliche Kraftinformation als virtuelle Feder dargestellt, so bevorzugen die Probanden dieses Dual-Source-Feedback gegenüber alleiniger vibrotaktile Darstellung der Neigung. Wird jedoch zusätzliche Kraftinformation als konstante Kraft dargestellt, ziehen die Probanden die alleinige vibrotaktile Darstellung der Neigung vor.

Einschätzung der wahrgenommenen Neigung.

Baseline. In Abbildung 5-11 sind die, vom Versuchsleiter verbal genannten, haptisch am Tilt-Board eingeschätzten Neigungen in Abhängigkeit der Gruppe (KK, KF) abgetragen. Die Probanden können die Winkel am Tilt-Board reproduzieren (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(4.7,131.4)=354.67$, $p<0.01$; $\eta^2=0.927$). Dabei zeigt sich eine Überschätzung der Winkel bis ca. 20° und eine Unterschätzung für Winkel größer als 20° (vgl. Proffitt, Bhalla, Gossweiler & Midgett, 1995). Ein linearer Trend erklärt die meiste Varianz ($F(1,28)=1235.0$, $p<0.01$; $\eta^2=0.978$). Die Probanden sind in der Lage verbal vorgegebene Winkel am Tilt-Board zu reproduzieren.

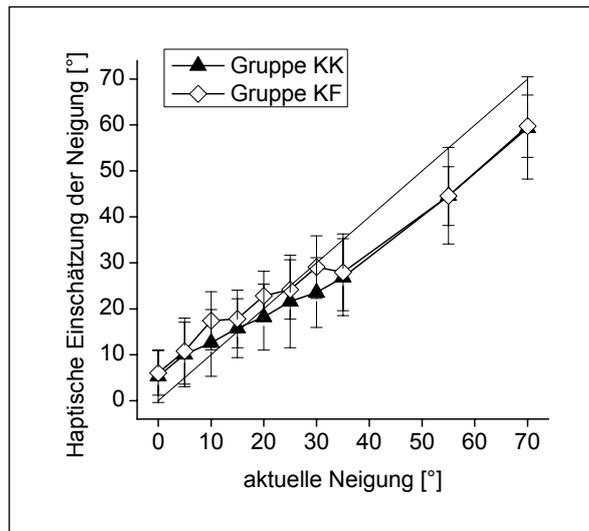


Abb. 5-11 Am Tilt-Board stellte der Proband die vom Versuchsleiter benannte Neigung direkt ein.

Kontrolle der experimentellen Manipulation. Reihenfolge der Einschätzungsmethode (haptisch-verbal, verbal-haptisch) beeinflusste die Performanz nicht ($F(1,28)=0.01$, $p=0.915$); darüber hinaus zeigt sich keine Interaktion zwischen Reihenfolge und den manipulierten Faktoren (Art des Feedbacks oder Art der Krafrückmeldung, Methode der Einschätzung, dargestellte Neigung).

Die Probanden können die unterschiedlichen Oberflächenneigungen über das haptische Interface wahrnehmen und reproduzieren (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.8,78.7)=175.62$, $p<0.01$; $\eta^2=0.862$). Ein linearer Trend erklärt am meisten Varianz ($F(1,28)=333.83$, $p<0.01$; $\eta^2=0.923$).

Die experimentelle Variation kann somit als erfolgreich angesehen werden; Reihenfolge der Einschätzungsmethode wird im Folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Gesamtbetrachtung der Daten. Tabelle 5-10 können die F-Statistiken der MANOVA entnommen werden. Es zeigt sich eine signifikante Beeinflussung der Neigungseinschätzung durch Variation der Neigung sowie die Interaktion zwischen Neigung und Antwortmethode (verbal, haptisch). Zwar wird auch die dreifache Interaktion bei zusätzlicher Variation der Informationsmenge (d.h. vibrotaktil ohne vs. mit Kraftfeedback) signifikant auf dem 5%-Niveau, die Effektstärke ist jedoch sehr gering. Kein anderer Effekt ist statistisch bedeutsam (s. auch Anhang E).

Tabelle 5-10 Relevante Ergebnisse der vierfaktoriellen MANOVA bezüglich der beiden Fehlerarten (variabel, absolut). Die übrigen Ergebnisse können im Anhang E nachgelesen werden.

		F-Wert (df)	p	η^2
HE Art des Kraftfeedbacks (2)	variabel	0.28 (1,28)	0.604	0.010
	absolut	0.21 (1,28)	0.647	0.008
HE haptische Informationsmenge (2)		0.22 (2,27)	0.805	0.016
WW Informationsmenge x Art des Kraftfeedbacks		0.23 (2,27)	0.792	0.017
HE Antwortmethode (2)		1.9 (2,27)	0.170	0.123
HE Neigung (8)		4.93 (14,392)	< 0.01	0.150
WW Antwortmethode x Neigung		12.56 (14,392)	< 0.01	0.310
WW Antwortmethode x Neigung x Informationsmenge		1.87 (14,392)	0.028	0.063

Um den Einfluss der signifikanten Effekte in Abhängigkeit der Fehlerarten zu bestimmen, werden zwei getrennte ANOVAs gerechnet. Die F-Statistiken der in der MANOVA signifikant gewordenen Effekte sind für beide Fehlerarten getrennt in Tabelle 5-11 abgetragen und werden im Folgenden getrennt betrachtet.

Tabelle 5-11 F-Statistiken der univariaten ANOVAs für A) absolute und B) variable Fehler beim Einschätzen der wahrgenommenen Neigung. Mit (*) gekennzeichnete Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	A) absolute Fehler			B) variabler Fehler		
	F-Wert (df)	p	η^2	F-Wert (df)	p	η^2
WW Antwortmethode x Neigung	8.40 (3,78)*	< 0.01	0.231	35.18 (2,63)*	< 0.01	0.557
HE Neigung (8)	6.78 (4,16)*	< 0.01	0.195	1.90 (3,79)*	0.140	0.064

Absoluter Fehler. Die am haptischen Interface dargestellte Ebenenneigung beeinflusst signifikant den absoluten Fehler: Mit zunehmender Neigung nimmt der absolute Fehler zu (linearer Trend $F(1,28)=20.69$, $p<0.01$; $\eta^2=0.425$). Die meiste Varianz der ANOVA wird durch die Wechselwirkung zwischen Antwortmethode und dargestellter Oberflächenneigung erklärt, wenngleich auch dieser Effekt als eher gering zu bewerten ist.

Um den Einfluss der Standardneigung unabhängig von der Methode der Einschätzung zu ermitteln, wurden erneut zwei getrennte ANOVAs berechnet. Die Standardneigung beeinflusst nur die Genauigkeit verbaler Einschätzung (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3,87)=12.98$, $p<0.01$; $\eta^2=0.317$): Mit zunehmender Oberflächenneigung nimmt der absolute Fehler zu (linearer Trend: $F(1,28)=30.03$, $p<0.01$; $\eta^2=0.518$). Werden die Oberflächenneigungen haptisch eingeschätzt, zeigt sich kein Einfluss der Oberflächenneigung auf die absolute Genauigkeit (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(4,121)=1.12$, $p=0.350$).

Variabler Fehler. Variationen bzgl. der am haptischen Interface dargestellten Neigung beeinflussen die Genauigkeit der Neigungseinschätzung nicht (vgl. Abbildung 5-12). Die Interaktion zwischen Methode der Einschätzung und Standardneigung beeinflusst den variablen Fehler in bedeutsamer Weise und erklärt am meisten Varianz.

Um den Einfluss der Antwortmethode auf die Performanz betrachten zu können, werden zwei getrennte ANOVAs für haptische und verbale Einschätzung berechnet und der Einfluss der Standardneigung auf den variablen Fehler ermittelt: Oberflächenneigung beeinflusst signifikant die Genauigkeit verbaler Einschätzung (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2,69)=6.57$, $p<0.01$; $\eta^2=0.190$) und lässt sich über einen quadratischen Trend erklären ($F(1,28)=20.55$, $p<0.01$; $\eta^2=0.423$): Der variable Fehler ist am geringsten für Neigungen von 10° und 15° und steigt mit zu- und abnehmender Neigung an.

Auch die Genauigkeit haptischer Einschätzung wird durch Variationen der Standardneigung beeinflusst (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3,86)=5.47$, $p<0.01$; $\eta^2=0.163$). Der Haupteffekt lässt sich gut durch einen linearen Trend erklären ($F(1,28)=10.56$, $p<0.01$; $\eta^2=0.274$): Mit zunehmender Neigung nimmt der variable Fehler ab.

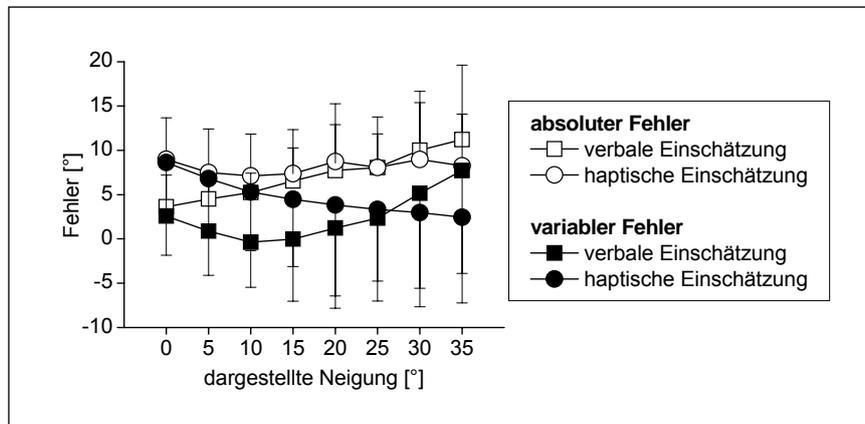


Abb. 5-12 Absolute und mittlere Fehler beim Einschätzen der über das haptische Ein-/Ausgabegerät dargestellten Oberflächenneigung. Die Methode der Einschätzung war haptisch und verbal.

5-2-3-3 Diskussion

Es wurde erwartet, dass die zurückgemeldete haptische Informationsmenge (vibrotaktilen ohne vs. mit Kraftfeedback) sowie die Art des Kraftfeedbacks (konstant, Federkraft) die Bewertung der Qualität und damit das Präsenzerleben beeinflusst (Hypothese VI-1). Die Qualität der Schnittstelle wurde unter allen Variationen unterschiedlicher Krafrückmeldung als annähernd gleich bewertet: Erhöhung der Informationsmenge führte demzufolge nicht zu einer Erhöhung des Präsenzerlebens. Die Qualität der Darstellung der Oberflächenneigung wurde darüber hinaus ebenfalls nicht unterschiedlich in Abhängigkeit der Feedbackarten bewertet; es zeigte sich jedoch der Trend, höhere Neigungen als weniger gut über das haptische Interface dargestellt zu raten. Werden die Probanden jedoch direkt befragt, welche der Feedbackarten sie bevorzugen, so zeigt sich ein Unterschied in den Experimentalgruppen. In Gruppe KF bevorzugen die Probanden die Rückmeldung mit zusätzlicher Kraftinformation (Kraftinformation als Federkraft), während Gruppe KK vibrotaktilen Feedback ohne zusätzliche Kraftinformation (umgesetzt als konstante Kraft) vorzieht.

Auch ein Einfluss der Feedbackarten auf die Performanz (variabler, konstanter Fehler) war erwartet worden (Hypothese VI-2), konnte jedoch nicht bestätigt werden: Weder die Informationsmenge (vibrotaktilen ohne vs. mit Kraftfeedback) noch die Art der Krafrückmeldung (konstante Kraft, Federkraft) beeinflussten signifikant die Einschätzungsfehler.

Wie schon von Pont et al. (1999) gezeigt wurde, können Menschen auch abstrakte Informationen zur Oberflächenneigung, die ihnen über drei Finger bei konstantem Fingerabstand durch ein haptisches Interface dargeboten werden, kombinieren und so die Neigung der virtuell generierten Oberfläche schätzen. Da bekannt ist, dass die haptische Wahrnehmung von Winkeln resp. Neigungen richtungsabhängig ist, wurde erwartet, dass sich dies auch bei der Wahrnehmung von virtuell generierten Neigungen an einer haptischen Schnittstelle zeigen lässt. Wie erwartet nahm der absolute Fehler mit zunehmender Neigung zu (Hypothese VI-3). Bedeutsamer war jedoch der Einfluss der Neigung abhängig von der Antwortmethode: Wurde die Neigung mittels der in der Literatur typischerweise verwendete Methode, d.h. das

haptische Reproduzieren der wahrgenommenen Neigung am Tilt-Board, eingeschätzt, so konnte eine Richtungsabhängigkeit der haptischen Einschätzung nicht nachgewiesen werden. Dies steht in Widerspruch zu Befunden aus der Literatur (z.B. Gentaz et al., 2001; Lechelt & Verenka, 1980). Während diese Studien jedoch stets die Hauptachsen mit den Diagonalachsen (45°) verglichen, konnte in der vorgestellten Studie als maximale Neigung lediglich 35° dargestellt werden. Eine weitere Erklärung für das Fehlen der Richtungsabhängigkeit der haptischen Einschätzung könnte sein, dass die Probanden die wahrgenommene Neigung am Tilt-Board einschätzen mussten, während sie noch das Exoskelett trugen; dies erschwerte das Adjustieren der Neigung besonders im Bereich der Horizontale²⁰.

Tabelle 5-12 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock VI „Wahrnehmung von Neigung über ein haptisches Interface – Einschätzung der Neigung“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
VI-1 Zusätzliche Krafrückmeldung erhöht das Präsenzerleben und die Beurteilung der Qualität des haptischen Interface	n. bestätigt	
VI-2 Zusätzliche Krafrückmeldung erhöht die Performanz	n. bestätigt	
VI-3 Die Genauigkeit der Neigungseinschätzung ist abhängig von der dargebotenen Neigung (Oblique-Effekt).	bestätigt	$\eta^2=0.15$ Zeigt Abhängigkeit von der verwendeten Methode (Interaktion: $\eta^2=0.31$)
VI-4 Die Antwortart bei der Einschätzung der Neigung beeinflusst die Genauigkeit: Haptisches Reproduzieren der wahrgenommenen Neigung unterscheidet sich von der verbalen Einschätzung	teilweise bestätigt	$\eta^2=0.32$ (verbal) Kein Einfluss bei haptischer Einschätzung

Eine Richtungsabhängigkeit (vgl. Oblique-Effekt der Klasse 2, Essock, 1980) zeigte sich jedoch bei der verbalen Einschätzung der wahrgenommenen Neigung (z.B. Lakatos & Marks, 1998; Proffitt et al., 1995). Das bedeutet, dass, obwohl die Wahl und Umsetzung der haptischen Einschätzung am Tilt-Board durch ein zusätzliches Tragen des Exoskeletts erschwert war, konnte die Richtungsabhängigkeit der Neigungsbeurteilung bei verbaler Einschätzung bestätigt werden. Die Methoden der Einschätzung unterscheiden sich demzufolge, obwohl erwartet, nicht in der allgemeinen Größe der Fehler (Hypothese VI-4), sondern v.a. qualitativ: Verbale Einschätzung der Neigung replizierte die aus der Literatur bekannte Richtungsabhängigkeit des haptischen Raums.

5-2-4 Experimentalblock VII – Wahrnehmung der Fingerabweichung

Werden haptische Reize über ein haptisches Interface an drei Finger vermittelt, so können Fehler bzw. Ungenauigkeiten bei der Darstellung der Ebenenneigung auftreten. Ist die Genauigkeit der Darstellung reduziert, kann die aktuelle Position der Finger von der tatsächlichen Ebene (in Sinne einer Darstellung ohne Abweichung) abweichen. Bei der Anordnung der Finger auf der (virtuell generierten) Ebene mag demzufolge die Abweichung eines Fingers ebenso relevant sein wie ein konstanter Abstand zwischen den Fingern (s. Pont et al., 1999). Geringe Abweichungen eines Fingers von der virtuellen Ebene können tolerierbar sein, wenn die Positionsabweichung unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegt. Die Ermittlung des gerade noch detektierbaren Abstands eines Fingers von der Ebene (und damit von den anderen beiden die Ebene kontaktierenden Fingern) ist von Bedeutung und erweitert die

²⁰ Einige Probanden gaben an, dass es ihnen schwer gefallen sei, die Horizontale zu finden und erklärten, dass sie für sich eine Horizontale definiert hätten.

in Kapitel 4 gewonnen Erkenntnisse über die Wahrnehmung von Ebenenneigung über ein haptisches Interface.

Wie bereits in Abschnitt 2-6 erläutert, sind Menschen in der Lage, die Stellung ihrer Gliedmaßen relativ genau wahrnehmen (z.B. Jones et al., 1992; Clark & Horch, 1986; Howard & Templeton, 1966). Dabei zeigt sich ein Einfluss der real zurückgelegten Strecke auf die Einschätzung der Distanz (z.B. McCloskey, 1978): Je kürzer die zurückzulegende Strecke, desto größer die Überschätzung und je größer die Distanz, desto größer die Unterschätzung (z.B. Howard & Templeton, 1966; Brown et al., 1948).

Wird eine horizontale Oberfläche mit drei Fingern exploriert, ist die von einer gemeinsamen, vordefinierten Starthöhe zurückzulegende Strecke für alle Finger gleich; der minimal detektierbare Unterschied sollte demzufolge unabhängig vom Target-Finger sein. Eine nach rechts geneigte Fläche induziert demgegenüber jedoch eine unterschiedlich weite Strecke für die einzelnen Fingern: Hier sollte der minimal detektierbare Unterschied von der Ebene abhängig vom Target-Finger sein (z.B. Brown et al., 1948; Howard & Templeton, 1966). Es wird daher erwartet, dass die Unterscheidungsfähigkeit bei einer horizontalen Ebene unabhängig vom Target-Finger ist, bei einer geneigten Ebene jedoch abhängig von der zurückgelegten Distanz.

Hypothese VII-1: Die Unterschiedsschwelle für Fingerabweichung bei einer horizontalen Ebene ist unabhängig vom Finger; bei einer geneigten Fläche ist der DL für Fingerabweichung abhängig von der zurückgelegten Distanz.

Wie in Abschnitt 5-2-1 diskutiert wurde, mag auch die Art haptischer Information, d.h. ob die Ebene über rein vibrotaktile oder durch zusätzliche Kraftinformation mediiert wird, gleichfalls die Diskriminierungsleistung für Fingerabweichung beeinflussen. Vibrotaktile Rückmeldung kann direkt an die Fingerspitzen vermittelt werden, wenn Kontakt hergestellt wird. Kraftinformation über ein Exoskelett meldet dabei die Berührung der Ebene durch einen zusätzlichen physikalischen Stopp der Finger zurück, d.h. der der Fingerbewegung entgegenwirkenden Kraft. In einigen Untersuchungen nahm die Genauigkeit der propriozeptiven Wahrnehmung ab, wenn eine intendierte Bewegung gestoppt wird (z.B. Clark & Horch, 1986; Rymer & D’Almeida, 1980; Howard & Anstis, 1974); dies konnte zwar für die Einschätzung der Neigung im vorangegangenen Abschnitt nicht gezeigt werden, könnte sich jedoch auf den minimal detektierbaren Unterschied auswirken.

Hypothese VII-1: Vibrotaktiler Feedback ohne zusätzliche Kraftinformation durch ein Exoskelett führt zu einer geringeren Unterschiedsschwelle.

5-2-4-1 Methode

Stimuli. Für das Experiment wurden erneut relativ zur horizontalen Basis nach rechts geneigte Ebenen definiert, die entweder über vibrotaktile oder vibrotaktile und zusätzliche Kraftinformation dargestellt wurden. Die zu explorierenden (virtuell generierten und lediglich haptisch umgesetzt) Ebenen waren entweder horizontal oder um 20° in Richtung Ringfinger geneigt, so dass bei der um 20° geneigten Fläche die vom Ringfinger zurückzulegende Distanz die längste war (s. Abschnitt 5-2-2). Die minimal mögliche Fingerabweichung von der dargestellten Fläche konnte getrennt für Zeige-, Mittel- und Ringfinger als Target-Finger erhoben werden.

Versuchsaufbau. Beide Ebenen wurden unter beiden Feedbackarten den Probanden über das haptische Interface gemäß Abschnitt 5-2-2 präsentiert. Sobald der Proband mit den Fingern die zuvor definierte Position (in Abhängigkeit der Neigung der Fläche) in einem Intervall $\Delta = \pm 3$ mm erreichte, wurde vibrotaktiler Feedback mit einer konstanten Frequenz von 40 Hz dargestellt. Zusätzliches Kraftfeedback (definiert als Federkraft $K_{Feder} = 1.2$ N/mm) wurde in einem Intervall $\Delta \leq 3$ mm über der definierten Position mit 1.2 N/mm, wie in Abschnitt 5-2-3 beschrieben, ausgegeben.

Im Gegensatz zu Abschnitt 5-2-3 wurde das Intervall, innerhalb dem haptische Rückmeldung gegeben wird, reduziert, um die Genauigkeit der dargestellten Ebene zu erhöhen.

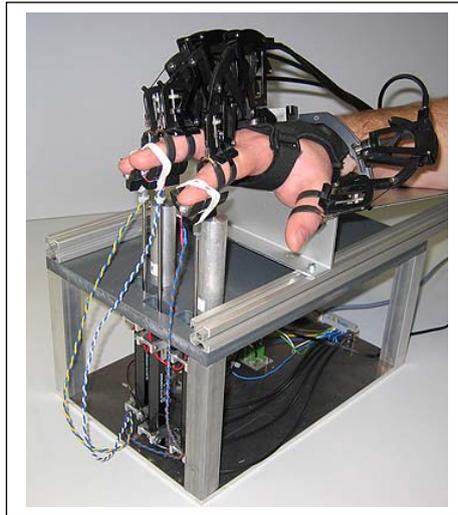


Abb. 5-13 Darstellung des haptischen Interface mit den an zwei Fingern (Zeige-, Mittel-) angebrachten Metallblöcken zur Darstellung der horizontalen Ebene. Der Ringfinger ist Target-Finger und somit freibeweglich. Während des experimentellen Durchgangs liegen die Finger der fixen Finger fest auf den Blöcken auf.

Während sich der Target-Finger frei ober- sowie unterhalb der virtuell generierten Fläche bewegen konnte, wurden die beiden anderen Finger auf konstanter Höhe fixiert (s. Abbildung 5-13). Zu diesem Zweck wurden Metallblöcke hergestellt und mit dem Display entsprechend verschraubt: Der Abstand der Finger von der Basis betrug für jeden Finger bei der 0° -Neigung 99 mm und für die um 20° geneigte Fläche entweder 99 mm (Zeigefinger), 84 mm (Mittelfinger) sowie 74 mm (Ringfinger). Visuelle Reize wurden durch das Tragen einer Schlafmaske während des gesamten Experiments ausgeschlossen.

Versuchsdesign. Um die Fragestellungen beantworten zu können, sind die zu testenden Faktoren *Target-Finger* (Mittel-, Ring- oder Zeigefinger) sowie die *Neigung* der dargestellten Ebene (0° , 20°). Es ergeben sich aufgrund der Erhebung der Unterschiedsschwelle jeder Neigung pro Finger sechs mögliche Kombinationen; diese sechs Reizbedingungen wurden als Innersubjektfaktor festgelegt. Zusätzlich variiert wurde die *haptische Rückmeldung* der Oberflächenneigung (mit zusätzlicher Krafrückmeldung VM vs. ohne zusätzliche Krafrückmeldung VO): Die Art der haptischen Rückmeldung wurde als Zwischengruppenfaktor umgesetzt.

Wie in Abschnitt 5-2-3 wurden neben der Unterschiedsschwelle am Ende der Sitzung die drei Fragen zur Qualität der Schnittstelle aus dem Präsenzfragebogen von Scheuchenpflug (2001) beantwortet (s. Abbildung 5-10B).

Versuchsablauf. Die Probanden nahmen, wie in Abschnitt 5-2-3 beschrieben, vor dem haptischen Interface Platz. Während Gruppe VM wie im vorherigen Abschnitt das Exoskelett trug

und die Finger an den Schalen der Positionssensoren befestigt wurden, wurde bei Gruppe VO auf das Exoskelett verzichtet. Abhängig vom Target-Finger und der Oberflächenneigung wurden die jeweiligen Metallblöcke für die beiden anderen Finger auf das Display geschraubt. Um den Experimentalablauf zu üben, wurden die Probanden in einem Training mit dem haptischen Interface und der Erhebungsmethode vertraut gemacht. Dafür wurden die Metallblöcke so mit dem Display verschraubt, dass eine geneigte Fläche entstand, die nicht zur Testung herangezogen wurde, d.h. Abstand des Zeigefingers vom Display betrug 84 mm und des Ringfingers 74 mm. Der Target-Finger war demzufolge während des Trainings der Mittelfinger.

Die Probanden wurden instruiert stets von der maximalen Position oberhalb der durch die Finger signalisierten Fläche zu beginnen und den Punkt (jeweils den ersten spürbaren Punkt) zu suchen, an dem sie mit dem Target-Finger die virtuelle Fläche erreichten bzw. das Feedback gegeben wird. Ein Reizdurchgang begann nach Aufforderung durch den Versuchsleiter mit dem Explorieren der Ebeneneigung von der definierten Startposition und endete mit der Antwort des Probanden.

Für alle sechs Reizbedingungen wurden die Unterschiedsschwellen erhoben; im Anschluss an die Testung beantworteten die Probanden den Fragebogen zur Qualität der Schnittstelle.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Für jeden Finger (Zeige-, Mittel-, Ring-) und beide Flächenneigungen (0° , 20°) wurde die Unterschiedsschwelle in beiden Gruppen (V, VP) auf gleiche Art mit dem adaptiven Staircase-Verfahren (s. Abschnitt 3-1-2-2) erhoben. Als Startwert wurde 16 mm oberhalb der Schwelle begonnen; die Schrittgröße während der ersten zehn Trials betrug 4.8 mm und wurde danach halbiert. Jeder Proband entschied, ob sich der Finger zum Zeitpunkt des Kontaktes oberhalb, auf oder unterhalb der virtuellen Fläche befand. Bei richtiger Antwort (oberhalb, wenn oberhalb) wurde die Schrittgröße reduziert, bei falscher Antwort (unterhalb oder gleich, wenn oberhalb), wurde sie wieder erhöht. Nach dem vierten Umkehrpunkt endete die Schwellwertbestimmung. Der DL wurde als Mittelwert der Umkehrpunkte errechnet und kennzeichnet somit den Punkt, an dem in 50% der Fälle richtig geantwortet wurde.

Statistische Analyse. Die Antworten der Probanden auf die einzelnen Präsenzfragen wurden deskriptiv dargestellt; über eine einfaktorielle MANOVA getestet, ob sich die Bewertung des Präsenzerlebens in Abhängigkeit der Gruppenzugehörigkeit (Feedback) unterschied. Mit einer dreifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung (*Target-Finger*, *Neigung*) und dem Gruppenfaktor *Feedback* (VO, VM) wurden die Hypothesen getestet. Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden mit der Greenhouse-Geisser Korrektur korrigiert; alle Effekte wurden auf dem 1%-Niveau getestet.

5-2-4-2 Ergebnisse: Wahrnehmung der Fingerabweichung

Stichprobe. Am Experimentalblock VII „Wahrnehmung von Neigung über ein haptisches Interface – Fingerabweichung“ nahmen 31 Studenten und Mitarbeiter der Universität der Bundeswehr München sowie der Technischen Universität München teil. Alle Probanden waren Rechtshänder. Eine Person musste von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, da ihre Hand zu klein war für eine komfortable Betätigung des Displays.

Eine Hälfte von ihnen (14 Männer, 1 Frau) erhielten nur vibrotaktilen Feedback (Gruppe VO); die Probanden waren im Mittel 28 Jahre alt. Die anderen 15 Probanden (10 Männer, 4 Frauen), im Mittel 26 Jahre alt, erhielten zusätzliche Krafrückmeldung über ein Exoskelett (Gruppe VM).

Bewertung der Qualität der Schnittstelle. Probanden der Gruppe VO bewerteten die Qualität der Schnittstelle mit einem Gesamtmittelwert von 13.3 (sd = 3.5) von maximal 21 Punkten, während die Probanden der Feedback-Gruppe VM einen Mittelwert von 12.4 (sd = 3.4) erhielten. Die beiden Gruppen zeigten nur geringfügige Unterschiede in der Bewertung ihres Präsenzerlebens. Der Unterschied wird weder für Frage 1 ($F(1,28)=5.25$, $p=0.082$), noch für Frage 2 ($F(1,28)=0.79$, $p=0.381$) oder für Frage 3 ($F(1,28)=0.64$, $p=0.429$) statistisch signifikant.

Tabelle 5-13 Bewertung des Präsenzerlebens in Abhängigkeit der haptischen Informationsmenge (vibrotaktile ohne vs. mit Krafrückmeldung) erfasst über 3 Fragen (s. Abbildung 5-10B).

	Ohne Kraftfeedback (VO)		Mit Kraftfeedback (VM)	
	MW	sd	MW	sd
Frage 1	4.6	1.1	3.7	1.5
Frage 2	4.8	1.6	4.3	1.3
Frage 3	3.9	1.4	4.3	1.3

Unterschiedsschwelle (DL). In Tabelle 5-14 können die DL entnommen werden. Geringere Abweichungen von der dargestellten Ebene können detektiert werden, wenn alleinige vibrotaktile Rückmeldung gegeben wird: Dabei zeigt sich der erwartete Effekt von fehlender fingerabhängiger Diskriminierungsleistung bei der Exploration horizontaler Ebenen, während bei der Exploration von Richtung Ringfinger geneigten Ebenen die Diskriminierungsleistung des Ringfingers drastisch abnimmt. Bei zusätzlicher Darstellung der Ebene über Kraftfeedback zeichnet sich ein eher unspezifischer, fingerabhängiger Einfluss auf die Diskriminierungsleistung ab.

Tabelle 5-14 Unterschiedsschwelle für Target-Finger, Neigung der Fläche und sowie haptisches Feedback.

Neigung	Target	Vibrotaktile Rückmeldung (VO)		Vibrotaktile und Krafrückmeldung (VM)	
		MW [mm]	sd [mm]	MW [mm]	sd [mm]
0°	Zeigefinger	8.54	5.06	11.62	5.15
	Mittelfinger	7.34	3.56	9.41	5.67
	Ringfinger	7.36	4.89	11.89	4.07
20°	Zeigefinger	7.08	4.32	9.68	5.75
	Mittelfinger	6.67	4.75	16.78	6.66
	Ringfinger	14.46	7.43	6.70	5.65

In Abbildung 5-14 sind die Unterschiedsschwellen (DL) graphisch dargestellt. Bei Oberflächenneigungen von 20° fallen die hohen DL für den Mittelfinger (Gruppe VM) bzw. Ringfinger (Gruppe VO) auf. Ansonsten scheinen sich die Werte der einzelnen Finger innerhalb der Gruppen kaum voneinander zu unterscheiden.

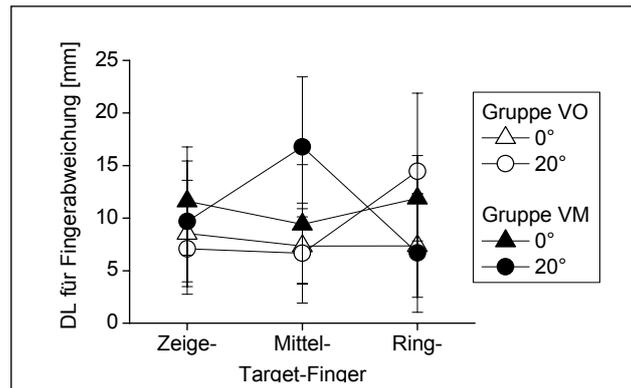


Abb. 5-14 Unterschiedsschwelle (DL) für die Wahrnehmung von Fingerabweichungen der Zeige-, Mittel- und Ringfinger von der simulierten geneigten Oberfläche (0°, 20°) für beide Experimentalgruppen (VO, VM).

In Tabelle 5-15 sind die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA abgetragen. Signifikant werden die Interaktionen zwischen Finger, Neigung und Feedback sowie Finger und Feedback und zuletzt Finger und Neigung. Das unterschiedliche Zusammenspiel zwischen Finger und Neigung wurde bereits deskriptiv für die beiden Feedbackarten getrennt betrachtet und kann auch Abbildung 5-14 entnommen werden.

Tabelle 5-15 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA.

	F-Wert (df)	p	η^2
WW Finger x Neigung x FB	30.66 (2,56)	< 0.01	0.523
WW Finger x FB	10.43 (2,56)	< 0.01	0.271
WW Finger x Neigung	7.49 (2,56)	< 0.01	0.211
HE Feedback FB (2)	3.02 (1,28)	0.093	0.097
HE Neigung (2)	2.36 (1,28)	0.136	0.078
WW Neigung x FB	1.94 (1,28)	0.175	0.065
HE Finger (3)	0.66 (2,56)	0.518	0.023

Um den Einfluss haptischer Rückmeldung (ohne bzw. mit zusätzlichem Kraftfeedback) in Abhängigkeit des Fingers zu erheben, wurden zwei für Neigung getrennte zweifaktorielle ANOVAs berechnet. Bei der Darstellung der horizontalen Ebene zeigt sich weder ein Einfluss des Target-Fingers (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.6,46.2)=2.09$, $p=0.143$), noch eine signifikante Interaktion zwischen Feedbackart und Target-Finger ($F(2,56)=1.03$, $p=0.365$). Der Haupteffekt Feedback wird auf dem 5%-Signifikanzniveau statistisch signifikant ($F(1,28)=5.07$, $p=0.032$; $\eta^2=0.153$): Alleinige vibrotaktile Rückmeldung resultiert in einem geringeren Fehler.

Wird eine Ebene von 20° dargestellt, so beeinflusst die Darstellungsart die Unterschiedsschwelle nicht signifikant ($F(1,28)=1.08$, $p=0.307$). Die Interaktion zwischen Finger und Feedback ($F(2,54)=64.16$, $p<0.01$; $\eta^2=0.483$) beeinflusst signifikant den DL und lässt sich auf eine Erhöhung des DLs beim Mittelfinger (Gruppe VM) und Ringfinger (Gruppe VO) sowie einer Reduzierung des DLs beim Ringfinger in Gruppe VM zurückführen. Der Haupteffekt Finger wird auf dem 5%-Signifikanzniveau signifikant ($F(2,56)=3.75$, $p=0.030$, $\eta^2=0.118$).

Zusammenfassung. Ein Einfluss des Target-Fingers in Abhängigkeit der dargestellten Neigung war erwartet worden (Hypothese VII-5) und konnte bestätigt werden. Bei der Exploration einer horizontalen Ebene war der minimal detektierbare Fingerabstand von der Ebene nicht abhängig vom Target-Finger, gleichgültig welches Feedback gegeben wurde. Zusätzlich zeigte sich geringere Sensitivität, wenn zusätzliches Kraftfeedback vorhanden war.

Wurde jedoch die um 20° in Richtung Ringfinger geneigte Ebene exploriert, war der exakte Zusammenhang abhängig von der Art der Rückmeldung: Bei rein vibrotaktile Rückmeldung nahm mit höherer zurückzulegender Distanz die Unterschiedsschwelle zu. Bei zusätzlicher Krafrückmeldung hingegen war der minimal detektierbare Unterschied am größten für den Mittelfinger. Dies deutet darauf hin, dass zusätzliche Krafrückmeldung über das CyberGrasp Exoskelett nicht nur bei der hohen Diskriminierungsleistung des Fingerabstands von horizontalen Ebenen zu einer Verschlechterung führt, sondern darüber hinaus die Wahrnehmbarkeit geneigter Ebenen beeinflussen könnte. Da jedoch die Experimentalgruppe mit rein vibrotaktile Rückmeldung kein Exoskelett trug, kann nicht eindeutig geklärt werden, ob die Ergebnisse auf das Hinzufügen von Krafrückmeldung oder das zusätzliche Tragen des Exoskeletts zurückzuführen ist. Um dies zu klären wird eine Nachuntersuchung nötig.

Wenngleich sich ein Unterschied bezüglich der Beziehung zwischen zurückgelegter Distanz und minimal wahrnehmbarer Fingerabweichung abhängig von der Feedback-Information ergab, so ist für die Probanden die Qualität der Schnittstelle nicht davon abhängig, welche Art der Rückmeldung gegeben wurde.

5-2-4-3 Nacherhebung zum Einfluss des Exoskeletts

Um den Einfluss des Exoskeletts zu erheben, wird das im letzten Abschnitt vorgestellte Experiment wiederholt und auch bei rein vibrotaktile Rückmeldung das Exoskelett getragen. Da beim vorangegangenen Experiment von einigen Probanden Schwierigkeiten bezüglich des Fingerabstands vom haptischen Interface berichtet wurden, wurden die Blöcke einheitlich verkürzt (s. unten). Die Veränderung der Höhe der Fingerposition relativ zur Armablage sollte die in Abschnitt 5-2-3 berichteten Ergebnisse (qualitativ) nicht beeinflussen; es wird erwartet, dass sich die Ergebnisse replizieren lassen. Die Hypothesen lauteten (s. entsprechend Abschnitt 5-2-1):

Hypothese VIIIn-1: Die Unterschiedsschwelle (DL) für Fingerabweichung bei einer horizontalen Ebene ist unabhängig vom Finger; bei einer geneigten Fläche jedoch ist der DL für Fingerabweichung abhängig von der zurückgelegten Distanz.

Hypothese VIIIn-2: Vibrotaktiler Feedback ohne zusätzliche Krafrückmeldung durch ein Exoskelett führt zu einer geringeren Unterschiedsschwelle.

Die in der Nacherhebung eingeführte Veränderung, d.h. die Reduzierung des Fingerabstands vom haptischen Interface sollte zu keiner qualitativen Veränderung der obigen Erwartungen im Vergleich zu den Vorergebnissen führen. Da sich jedoch die zurückzulegende Distanz erhöht haben wird und eine Abhängigkeit der Diskriminierungsleistung mit der zurückzulegenden Wegstrecke bereits gezeigt werden konnte, wird darüber hinaus erwartet, dass sich – im Vergleich zum vorangegangenen Abschnitt – eine allgemeine Reduzierung des Fingerabstands vom haptischen Interface beeinträchtigend auf den DL auswirkt (z.B. Howard & Templeton, 1966; Brown et al., 1948).

Hypothese VIIIn-3: Eine Erhöhung der zurückzulegenden Distanz führt zu einer generellen Abnahme des DL.

Methode.

Versuchsdesign. Einfluss des *Target-Fingers* (Mittel-, Ring- oder Zeigefinger) sowie der *Neigung* der dargestellten Ebene (0° , 20°) wurden wie in Abschnitt 5-2-4-3 als Innersubjekt-faktoren umgesetzt. Auch die Art der *haptischen Rückmeldung* (vibrotaktile Rückmeldung mit bzw. ohne Krafrückmeldung) wurden als Innersubjektfaktor eingeführt; um die Testzeit gering zu halten, wurde die Testung auf zwei Sitzungen, getrennt nach Rückmeldungsart, aufgeteilt.

Zusätzlich wurde von den Probanden am Ende jeden Testtages (d.h. bezüglich der beiden Rückmeldungsarten) die drei Fragen zum Präsenzerleben (s. Abbildung 5-10B) beantwortet.

Versuchsdurchführung. Dieselben Reize, wie in Abschnitt 5-2-4-3 dargestellt, wurden verwendet: Target-Finger waren Zeige-, Mittel- und Ringfinger, die dargestellten Flächen waren entweder um 0° oder 20° in Richtung Ringfinger geneigt. Die haptische Rückmeldung bestand entweder aus rein vibrotaktile oder gemeinsamer vibrotaktile Rückmeldung und Krafrückmeldung über den CyberGrasp. Alle Probanden trugen das Exoskelett, auch wenn nur vibrotaktile Rückmeldung gegeben wurde (Versuchsaufbau ansonsten entsprechend wie in Abschnitt 5-2-2 und 5-2-4-3 beschrieben).

Wie im vorherigen Experiment wurden Metallblöcke unterschiedlicher Höhe produziert, um für die Bestimmung der Unterschiedsschwelle am Target-Finger eine konstante Referenz über die anderen beiden Finger zu erhalten. Für die Darstellung der Horizontalen betrug der Abstand der Finger vom haptischen Interface 80 mm, für die Darstellung der 20° -Ebenen-neigung für den Zeigefinger 80 mm, 71 mm für den Mittel- und 60 mm für den Ringfinger.

Experimenteller Ablauf und Prozedur der Unterschiedsschwelle (DL). Methode sowie Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle wurden repliziert (s. Abschnitt 5-2-4-1).

Statistische Analyse. Zuerst wurde der Einfluss von Feedback auf die drei Präsenzfragen ermittelt; da die Stichprobengröße gering ist, wird aus den 3 Fragen ein Summenscore gebildet; der Einfluss des Feedbacks wird über einen t-Test für abhängige Gruppen geprüft. Die Hypothesen werden mit einer dreifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung (*Target-Finger*, *Neigung*, *Feedback*) getestet. Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden mit der Greenhouse-Geisser Korrektur korrigiert; alle Effekte wurden auf dem 1%-Niveau getestet. Im Anschluss wurde mit zwei nach Feedbackart getrennten ANOVAs der zusätzliche Einfluss der Reduzierung der Target-Höhe, dem Faktor *Zurückgelegte Distanz*, getestet (Hypothese VIIIn-3).

Ergebnisse.

Stichprobe. An der Nacherhebung (VIIIn) nahmen zehn Studenten (4 Männer, 6 Frauen) der Technischen Universität und der Ludwigs-Maximilians-Universität München teil. Das durchschnittliche Alter lag bei 24 Jahren.

Präsenzerleben. Wurde vibrotaktile Rückmeldung ohne Krafrückmeldung gegeben, bewerteten die Probanden die Qualität der Schnittstelle mit einem Gesamtmittelwert von 12.3 (sd = 1.6) von maximal erreichbaren 21 Punkten, während bei zusätzlicher Krafrückmeldung die Schnittstelle mit einem Mittelwert von 12.5 (sd = 2.0) geantwortet wurde. Eine Variation der Rückmeldungsart beeinflusste die Bewertung der Qualität der Schnittstelle nicht ($t(9)=0.23$, $p=0.823$)

Unterschiedsschwelle (DL). Die Unterschiedsschwellen können Tabelle 5-16 entnommen werden. Erneut zeigt sich eine leichte Tendenz für geringere detektierbare Abweichungen

von der dargestellten Ebene, wenn diese allein durch vibrotaktile Rückmeldung dargestellt wird.

Tabelle 5-16 Unterschiedsschwellen für Target-Finger, Neigung der Fläche und Feedback.

Neigung	Target	Vibrationen		Vibrationen & Kraft	
		MW [mm]	sd [mm]	MW [mm]	sd [mm]
0°	Zeigefinger	13.44	8.78	19.36	8.82
	Mittelfinger	11.96	6.12	15.27	7.20
	Ringfinger	16.70	6.93	23.77	6.93
20°	Zeigefinger	18.04	11.42	19.55	10.00
	Mittelfinger	9.03	6.81	10.15	6.98
	Ringfinger	23.80	11.02	24.44	9.30

Wie in Abbildung 5-15 illustriert, ist der DL bei der um 20° geneigten Ebene besonders für den Ringfinger erhöht, d.h. die Diskriminierungsleistung beeinträchtigt. Die Variation des Feedbacks beeinflusste die Sensitivität nicht, auch bei zusätzlicher Krafrückmeldung zeigt sich dasselbe Bild. Die Unterschiedsschwelle bei der Exploration der Horizontalen bei vibrotaktile Rückmeldung ist unabhängig vom Target-Finger, nicht jedoch bei zusätzlicher Kraft-Rückmeldung.

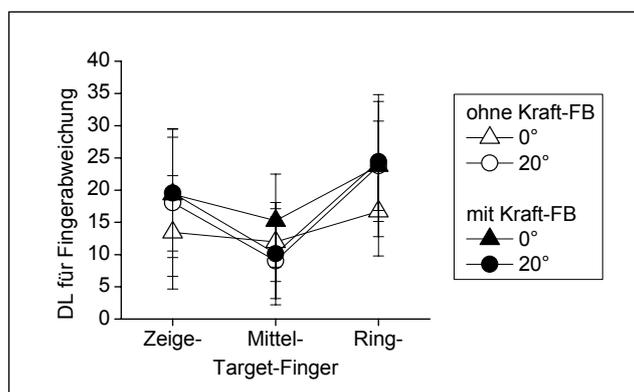


Abb. 5-15 Unterschiedsschwellen für Zeige-, Mittel- und Ringfinger in Abhängigkeit der Neigung der Oberfläche (0°, 20°) sowie für beide Gruppen (vibrotaktiler Feedback ohne bzw. mit Kraft-Feedback)

In Tabelle 5-17 sind die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA abgetragen. Besonders der Target-Finger beeinflusst die Sensitivität: Wie in Abbildung 5-15 ersichtlich, nimmt zum Ringfinger hin die Sensitivität ab; Bonferroni-post-hoc Tests zeigen nur einen signifikanten Unterschied zwischen Mittel- und Ringfinger ($p < 0.01$), nicht zwischen den anderen Fingern.

Tabelle 5-17 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA. Alle mit (*) gekennzeichneten Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Finger (3)	10.13 (2,18)	< 0.01	0.529
WW Neigung x FB	6.30 (1,9)	0.033	0.412
HE Feedback FB (2)	3.68 (1,9)	0.087	0.290
WW Finger x Neigung	3.54 (1.2,10.7)*	0.083	0.282
HE Neigung (3)	0.55 (1,9)	0.475	0.058
WW Finger x Neigung x FB	0.45 (2,18)	0.646	0.047
WW Finger x FB	0.22 (2,18)	0.801	0.024

Zusätzlich wird die Interaktion zwischen Finger und Feedback auf dem 5%-Signifikanzniveau signifikant: Bei horizontalen Flächen zeichnet sich eine Überlegenheit alleiniger vibrotaktile Rückmeldung ab (s. Abbildung 5-16). Der Haupteffekt Feedback wird gerade nicht signifikant, deutet jedoch auch auf höhere Sensitivität bei alleiniger vibrotaktile Rückmeldung hin.

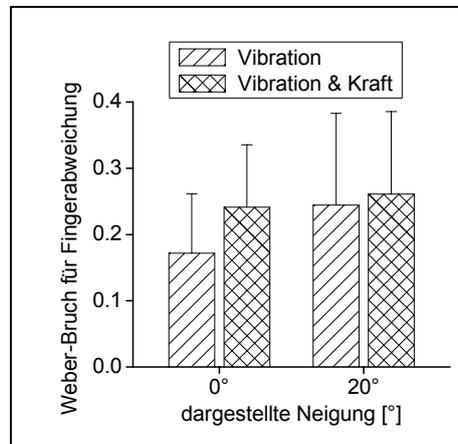


Abb. 5-16 DL für 0° und 20°-Neigung in Abhängigkeit des Feedbacks (Vibration, Vibration & Kraft).

Einfluss der zurückzulegenden Distanz. In Abschnitt 5-2-4-3 zeigte sich ein Einfluss der Rückmeldungsart; auch bei der Nacherhebung beeinflusst die Rückmeldungsart die Unterschiedsschwelle. Wird zusätzlich auch bei rein vibrotaktile Rückmeldung das Exoskelett getragen, scheint der Einfluss zwischen Finger und Oberflächenneigung unverändert. Im Gegensatz dazu verändert sich die Performanz bei zusätzlicher Krafrückmeldung in Abhängigkeit der zurückzulegenden Distanz.

Um zu testen, ob sich eine Variation der zurückzulegenden Distanz auf die DL auswirkt, werden zwei dreifaktorielle ANOVAs getrennt für die Feedbackarten mit den Messwiederholungsfaktoren Neigung und Finger sowie dem Gruppenfaktor zurückgelegte Distanz berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-18 zusammengestellt.

Wird vibrotaktil Feedback (s. Tabelle 5-18A) zurückgemeldet, zeigt sich insbesondere ein Unterschied aufgrund der Erhöhung zurückzulegender Distanz: Bei geringerem Weg bis zum Kontakt mit der Ebene können geringere Abweichungen detektiert werden. Darüber hinaus beeinflusst auch die Neigung der Ebene signifikant die Unterschiedsschwelle: Der DL bei um 20° geneigten Flächen ist größer als bei der Exploration der Horizontalen. Der Einfluss des Target-Fingers lässt sich auf eine höhere Diskriminierungsleistung des Mittel- gegenüber des Ringfingers zurückzuführen (Bonferroni-post-hoc Test, $p < 0.01$). Die Wechselwirkung zwischen Target-Finger und Neigung wird statistisch bedeutsam: Der DL nimmt am stärksten für den Ringfinger bei geneigter Fläche zu.

Tabelle 5-18 F-Statistiken der getrennten dreifaktoriellen ANOVAs zum Vergleich der Ergebnisse aus Abschnitt 4-4-3 mit der Nacherhebung. Mit (*) gekennzeichnete Werte wurden nach Greenhouse Geisser korrigiert.

	A) Vibration			B) Vibration & Krafrückmeldung		
	F-Wert (df)	p	η^2	F-Wert (df)	p	η^2
HE Finger (3)	9.51 (2,46)	< 0.01	0.293	6.99 (2,46)	< 0.01	0.233
HE Neigung (2)	11.81 (1,23)	< 0.01	0.339	0.73 (1,23)	0.403	0.031
WW Finger x Neigung	11.27 (1.6,35.6)*	< 0.01	0.329	1.49 (2,46)	0.237	0.061
WW Finger x Distanz	1.89 (2,46)	0.162	0.076	28.25 (2,46)	< 0.01	0.551
WW Neigung x Distanz	0.90 (1,23)	0.353	0.038	0.91 (1,23)	0.349	0.038
WW Finger x Neigung x Distanz	2.59 (1.6,35.6)*	0.100	0.101	12.07 (2,46)	< 0.01	0.344
HE Distanz (2)	17.33 (1,23)	< 0.01	0.430	13.92 (1,23)	< 0.01	0.377

Wird die Ebene durch vibrotaktilen und zugleich Kraftfeedback dargestellt (s. Tabelle 5-18B), findet sich erneut ein signifikanter Einfluss der zurückzulegenden Distanz auf den DL: Bei größerer Wegstrecke bis zum Kontakt mit der dargestellten Ebene erhöht sich der minimal detektierbare Abstand des Target-Fingers von der Fläche. Darüber hinaus wird die Interaktion zwischen Target-Finger und Distanz statistisch signifikant und lässt sich auf einen die Sensitivität reduzierenden Einfluss der Distanz besonders bei Zeige- und Ringfinger, nicht jedoch beim Mittelfinger zurückführen (siehe dazu Abbildung 5-17). Auch der Target-Finger unterscheidet sich hinsichtlich seines Auflösungsvermögens der Fingerabweichung von der haptisch dargestellten Ebene: Bonferroni-post-hoc Tests zeigten erneut lediglich einen signifikanten Unterschied zwischen Ring- und Mittelfinger ($p < 0.01$).

Die dreifache Wechselwirkung zwischen Distanz, Finger und Neigung lässt sich auf eine allgemeine, d.h. fingerunabhängige, Reduzierung der Sensitivität bei einer horizontalen Ebene zurückführen, während bei einer 20°-Neigung sich ein dem in Abbildung 5-17 ähnlicher Effekt abzeichnet.

Zusammengenommen bedeutet dies, dass erneut die Darstellung der Ebenenneigung über alleiniges vibrotaktilen Feedback zu den erwarteten Effekten der Reduzierung allgemeiner Sensitivität führt. Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Experiment werden weitestgehend repliziert. Daraus kann geschlossen werden, dass das zusätzliche Tragen des Exoskeletts die Wahrnehmung der dargestellten Ebenenneigung bei reiner vibrotaktile Rückmeldung nicht beeinträchtigt.

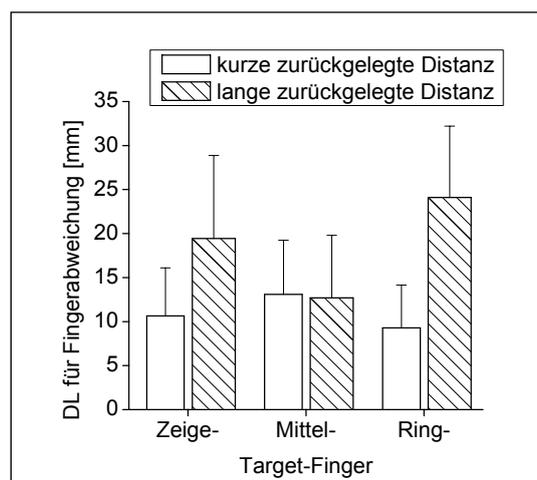


Abb. 5-17 Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit des Target-Fingers, wenn vibrotaktilen und Kraftfeedback gegeben wird, sowie der vom Startpunkt aus zurückzulegenden Distanz.

Dem entgegen verändert sich, im Vergleich zum vorangegangenen Experiment, die Sensitivität bei der um 20° geneigten Ebene bei Dual-Source-Feedback: Nicht der Mittelfinger zeigt das schlechteste Auflösungsvermögen, sondern wie auch bei nur vibrotaktile Rückmeldung, der Ringfinger.

5-2-4-4 Diskussion

Die minimal mögliche Abweichung eines Fingers von einer horizontalen oder um 20° geneigten Ebene wurde für alle drei Finger, die die Ebene kontaktierten, erhoben (Zusammenfassung s. Tabelle 5-18). Da ein Einfluss der zurückzulegenden Distanz bereits aus der Literatur

bekannt war (z.B. Howard & Templeton, 1966; Brown et al., 1948), war ein Einfluss der Wechselwirkung zwischen Target-Finger und Oberflächenneigung erwartet worden (Hypothese VIIIn-1): In Abhängigkeit der zurückzulegenden Distanz sollte sich der DL verändern, und dies besonders bei einer um 20° geneigten Ebene und (aufgrund der Umsetzung der Neigung in Richtung Ringfinger) besonders markant für den Ringfinger. Diese Hypothese konnte in der Nacherhebung so nicht bestätigt werden. Besonders Target-Finger und der Einfluss der Rückmeldungsart waren bedeutsam.

Für die Nacherhebung war darüber hinaus die Höhe der Metallblöcke reduziert worden, was in einer Erhöhung der allgemein zurückzulegenden Distanz resultierte, deren Einfluss auf die DL (Hypothese V-7) untersucht wurde: Wie erwartet, erhöhte sich der DL signifikant, wenn eine längere Distanz zurückzulegen war.

Ein Einfluss der Rückmeldungsart, d.h. ob vibrotaktil oder vibrotaktil und zusätzliches Kraftfeedback gegeben wurde, war erwartet worden (Hypothese VIIIn-2), beeinflusste jedoch weder die Bewertung der Qualität der Schnittstelle noch den DL. Es zeigte sich jedoch eine Abhängigkeit von der dargestellten Neigung: Das haptische Auflösungsvermögen von Fingerabweichungen von einer horizontalen Fläche war bei rein vibrotaktile Rückmeldung überlegen.

Bei alleiniger vibrotaktile Darstellung unterschieden sich die Ergebnisse, d.h. der Einfluss von Target-Finger und Neigung (s. Abschnitt 5-2-4-3), nicht von denen mit kürzerer Distanz (s. Abschnitt 5-2-4-2): Dies bedeutet, dass der Einfluss eines zusätzlich getragenen Exoskeletts zu vernachlässigen ist.

Wird jedoch die geneigte Ebene durch vibrotaktil und zusätzliches Kraftfeedback umgesetzt, bewirkt eine erhöhte allgemeine Distanz eine Veränderung der Diskriminierungsleistung in Abhängigkeit des Fingers: Bei kürzerer Distanz ist der Mittelfinger, bei längerer Distanz der Ringfinger unterlegen.

Tabelle 5-19 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse aus dem Experimentalblock VII „Wahrnehmung von Neigung über ein haptisches Interface – Fingerabweichung“ sowie der Nacherhebung VIIIn.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
VII-1 Der DL für Fingerabweichung bei einer horizontalen Ebene ist unabhängig vom Finger; bei einer geneigten Fläche jedoch abhängig von der zurückgelegten Distanz	teilweise bestätigt	$\eta^2=0.33$ (Vibration)
VII-2 Vibrotaktil Feedback ohne zusätzliche Krafrückmeldung durch ein Exoskelett führt zu einem geringeren DL	teilweise bestätigt	bes. abhängig von Neigung (bei 0°)
VII-3 Eine Erhöhung der zurückzulegenden Distanz führt zu einer generellen Abnahme des DL	bestätigt	$\eta^2=0.43$ (Vibration) $\eta^2=0.38$ (Vibration & Kraft)

Zusammengenommen bedeutet dies, dass die hier realisierte (zusätzliche) Krafrückmeldung nicht zu einer Unterstützung der Wahrnehmung der Neigung der Ebene führt, sondern eher, vergleichbar einem vergrößerten Messrauschen, zu vermehrter Unschärfe. Dies erschwert die Wahrnehmung der Fingerabweichung von der zu explorierenden geneigten Ebene und steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Literatur, die zeigten, dass ein während der Bewegung auftretender Stopp die Genauigkeit der Wahrnehmung reduzieren kann (z.B. Clark & Horch, 1986; Rymer & D’Almeida, 1980; Howard & Anstis, 1974).

5-2-5 Zusammenfassung

In Abschnitt 5-2-3 wurde der Einfluss zusätzlichen Feedbacks auf die Qualität dargestellter Kraftinformation und die Neigungseinschätzungen untersucht. Die Probanden zeigten dabei eine durchweg hohe Performanz, d.h. sie waren in der Lage die über das haptische Interface dargebotenen Neigungen mit der erwarteten Genauigkeit (Oblique-Effekt) wiederzugeben. Eine Erhöhung der Informationsmenge (Darbietung zusätzlicher Kraftinformation zu vibrotaktilen Feedback) führte jedoch nicht zu einem höheren Präsenzerleben oder einer verbesserten Neigungseinschätzung.

In Abschnitt 5-2-4 war die minimal detektierbare Abweichung eines Fingers von der über das haptische Interface dargebotenen Ebene erhoben worden. Geringe Abweichungen waren, wie erwartet, tolerierbar, hingen jedoch von der zurückzulegenden Distanz bis zum Kontaktzeitpunkt ab. Je weiter die Finger von der zu kontaktierenden Ebene entfernt waren, desto größere Abweichungen blieben unbemerkt.

Darüber hinaus zeigte sich ein Einfluss der Informationsmenge (Vibration, Vibration und Kraft) nur bei der Wahrnehmung der Neigung, bei der auch die allgemeine Diskriminierungsleistung (DL) besonders hoch war. In diesem Fall wurden bereits geringere Abweichungen erkannt, wenn diese über vibrotaktilen Feedback dargestellt wurden. Dies indiziert, dass das Hinzufügen zusätzlicher Kraft- zu vibrotaktilen Feedback nicht die Wahrnehmbarkeit der dargestellten Neigung erhöht, sondern durch verstärktes (Wahrnehmungs-) Rauschen, die Wahrnehmung der Neigung erschwert.

Da in beiden Experimenten Dual-Source-Feedback weder zu einer Verbesserung der Performanz noch zur Beurteilung der Qualität der Schnittstelle führte, sondern sogar tendenziell zu einer Verschlechterung der Diskriminierungsleistung beizutragen scheint, ist es ausreichend, in einem wie in Abschnitt 5-2-2 vorgestellten haptischen Interface Neigungsinformationen über alleiniges vibrotaktilen Feedback darzustellen.

6 INTEGRATION SENSORISCHER INFORMATIONEN

„The integration of inputs from different sensory modalities not only transforms some of their individual characteristics [...]. Integrated sensory inputs produce far richer experience than would be predicted from their simple coexistence or the linear sum of their individual products.”

(Stein & Meredith, 1993, p. xi)

In modernen TPTA-Systemen werden nicht nur Informationen aus einer Modalität übermittelt, wie bisher Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war, sondern aus mehreren Modalitäten. Daher wird im Folgenden die Haptik um die Sicht ergänzt. Wie bereits in Kapitel 1 erläutert, können auch hier bei der Datenübertragung Datenverlust und variable Zeitverzögerungen auftreten, die sich jeweils auf eine Sinnesmodalität (Haptik) beziehen. Zusätzlich können Abweichungen zwischen Sicht und Haptik in der Darstellung eines physikalischen Parameters entstehen (s. Kapitel 7)²¹.

Zahlreiche Forscher und Forschergruppen haben sich daher mit dem Einfluss nicht übereinstimmender Information auf die Wahrnehmung beschäftigt: Ein kurzer Überblick über die neuronalen Grundlagen visuell-haptischer Integration, Integrationsmodelle sowie zur Wahrnehmung visuell-haptischer Konflikte ist daher Basis für jegliche Untersuchungen zu dieser Problematik und wird im Folgenden gegeben.

6-1 Neuronale Grundlagen

Signale werden getrennt durch die Sinnesorgane aufgenommen und verarbeitet; sie konvergieren auf höherer Ebene und werden dort bedeutungshaltig verknüpft. Polysensorische Konvergenz findet neben der *Formatio Reticularis* im *Colliculus Superior* (neuroanatomisch der vordere Hügel des *Tectums*) statt.

In der *Formatio Reticularis* treffen Informationen aus unterschiedlichen Sinnesorganen aufeinander und werden von dort über die Basalganglien mit dem Motorkortex oder über den Thalamus mit den sensorischen Kortizes verschaltet (z.B. Schmidt & Thews, 1983).

Die Aufgabe des *Colliculus Superior* ist neben der Steuerung von Aufmerksamkeit besonders die Aufnahme, Kombination und Weiterleitung von Informationen über die Orientierung im Raum aus den eintreffenden sensorischen und motorischen Signalen (für einen Überblick s. Stein & Meredith, 1993). Sensorische Informationen gelangen aus der Retina, dem Rückenmark und dem Hirnstamm in den *Colliculus Superior* (vgl. auch Jiang, Wallace, Jiang, Vaughn & Stein, 2001); zusätzlich werden Signale aus der Großhirnrinde zugeschaltet. Die

²¹ Es können auch zeitliche Verzögerungen zwischen den Modalitäten auftreten, die die Wahrnehmung beeinflussen (vgl. Wer-muth, 1998). Dieses Themengebiet liefert Stoff für eine eigenständige Untersuchungsreihe und wird daher in dieser Arbeit nicht behandelt. Erste Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 453 „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ als Fortführung der hier vorliegenden Arbeit und der Dissertation von Martin Kuschel (in Vorbereitung) an der Technischen Universität München bereits begonnen (Teilprojekt M9).

verarbeiteten Informationen werden v.a. durch multisensorische Neurone über Nervenfasern an die Hirnnervenkerne, die *Formatio Reticularis* und das Rückenmark weitergeleitet.

Die multisensorischen Informationen werden in unterschiedliche Schichten des *Colliculus Superior* geleitet: In den Außenschichten treffen visuelle Signale ein (visotope Kartierung), in den tieferen Schichten somatosensorische²² (somatotope Kartierung). Dabei erleichtert eine überlappende, säulenartige Anordnung der visuellen über den somatosensorischen Schichten eine schnelle Verschaltung. Die Neurone des *Colliculus Superior* sind zudem entweder unimodal oder (zahlenmäßig überlegen) multimodal organisiert.

Die eintreffenden Signale können auf unterschiedliche Weise verschaltet werden: Durch Reaktionsverstärkung (*engl.* *response enhancement*), d.h. erhöhte Feuerungsraten bei konvergenter räumlich und / oder zeitlich koinzidenter Information, oder durch Reaktionsunterdrückung (*engl.* *response depression*) bzw. fehlende Reaktion oder Reaktionsunterdrückung bei disparater konvergierender Information (vgl. Holmes & Spence, 2005; Meredith, 2002). Dabei führt Reaktionsverstärkung nicht einfach zu einer Erhöhung der Feuerungsrate bei konvergierender Information, sondern übersteigt die reine Summe der Feuerungsraten; dies wird als Superadditivität bezeichnet.

Multisensorische Neurone weisen zwei Arten von rezeptiven Feldern auf: Große rezeptive Felder mit einer optimale Region, innerhalb der ankommende Signale eine stärkere Feuerungsrate hervorrufen, oder rezeptive Felder mit ON-Zentrum, innerhalb der ankommende Signale weitergeleitet und außerhalb der die Weiterleitung unterdrückt wird. Multimodale Informationen werden demzufolge integriert, wenn ihre räumliche Diskrepanz nicht zu groß ist und die Impulsdauer sich überlappt: Multisensorische Neurone reagieren dann meist umso stärker, wenn die unimodale Stimulierung gering ist (vgl. Holmes & Spence, 2005).

Daneben spielen auch temporale Aspekte eine Rolle: Solange sich die Impulsdauer unimodaler Informationen zeitlich überlappt²³, kann noch integriert werden; diese zeitkritische Komponente (das sog. „temporal window of integration“; Stein & Meredith, 1993, p. 135) beträgt weniger als 400 ms (meist sogar unter 100 ms; s. Meredith, 2002) bei simultaner Stimulierung und kann bis zu 1.500 ms betragen, wenn der Onset der unimodalen Reize verschoben ist: Visuell-haptische Latenzen von ca. 13-108 ms sind noch tolerierbar (vgl. Meredith, Nemitz & Stein, 1987).

6-2 Grundlagen multisensorischer Integration

Bei multisensorischer Wahrnehmung werden wie in Abschnitt 6-1 beschrieben sensorische Informationen konvergiert und integriert. Dabei können auch noch physikalisch inkongruente Reize zu einem einheitlichen Gesamtbild zusammengeführt werden; wie diese Integration modelliert werden kann, wird in Abschnitt 6-2-1 vorgestellt.

Die erlaubten Abweichungen können jedoch auch teilweise größer sein als die aufgrund der Überlappung neuronaler Impulse vorhergesagten. Marks (2004) bezeichnete die Konvergenz multisensorischer physikalisch diskrepanter Information zur (Wieder-)Herstellung einer ganzheitlichen Wahrnehmung als perzeptuelle Integration. Welche Informationen nötig sind, damit Integration stattfinden kann, wird in Abschnitt 6-2-2 besprochen. Die Methoden zur Untersuchung von Integration werden in Abschnitt 6-2-3 skizziert.

²² Auch auditive Signale werden im *Colliculus Superior* verarbeitet; im Gegensatz zu den visuellen und somatosensorischen Schichten ist jedoch die auditive weniger räumlich als nach Frequenzen kartiert.

²³ Somatosensorische Reize erreichen von der Haut in ca. 26 ms den *Colliculus Superior*, auditive Reize nahe des Ohrs in ca. 13 ms, visuelle Reize sind am langsamsten mit ca. 65-100 ms (z.B. Stein & Meredith, 1993).

6-2-1 Modelle sensorischer Integration

Es existieren unterschiedliche theoretische Ansätze, wie Informationen aus mehreren Sinnesmodalitäten integriert werden können. Ein Großteil der Forschung konzentrierte sich dabei auf die Integration visueller und auditiver Informationen, weniger beschäftigte sich die Forschung mit visuell-haptischer Integration (für eine Zusammenfassung s. außerdem Welch & Warren, 1986). Die drei einflussreichsten Integrationsmodelle werden im Folgenden kurz vorgestellt (s. dazu Abbildung 6-1).

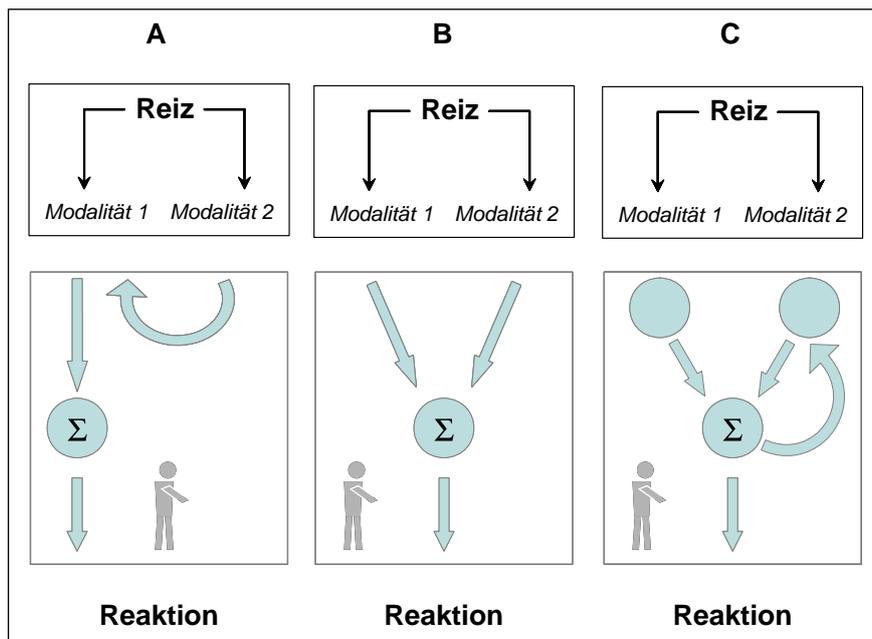


Abb. 6-1 Mögliche Modelle zur Reizintegration (nach Massaro, 1999; Driver & Spence, 2000): A) Orthogonaler Einfluss auf unimodale Wahrnehmung (sensorische Penetration), B) Feedforward-Konvergenz, C) Feedforward-Konvergenz mit Feedback-Schleife.

Modell A. Beeinflusst eine Modalität die andere, ohne mit ihr in inhaltlichem (also quasi orthogonalem) Zusammenhang zu stehen, bezeichnet dies Massaro (1999) als „sensory penetration“ (p. 314; s. Abbildung 6-1A). Diese orthogonale sensorische Penetration findet während früher unimodaler Verarbeitung statt (z.B. Driver & Spence, 2000; Shimojo & Shams, 2001).

Untersuchungen zeigen, dass Reize aufgrund ihrer zeitlichen Kontiguität einander beeinflussen können, d.h. dass beispielsweise die gleichzeitige Darbietung auditiver Reize die visuelle Wahrnehmung beeinflusst (z.B. Odgaard, Arieh & Marks, 2004; Vroomen & De Gelder, 2000; Shams, Katami & Shimojo, 2000; Stein, London, Wilkinson & Price, 1996; Myers, Cotton & Hilp, 1981; Taylor & Campbell, 1976). Dieses Phänomen wurde auch bzgl. der Beeinflussung haptischer Wahrnehmung berichtet (z.B. Bresciani et al., 2005). Weitere Beispiele zeigen eine Erhöhung der Detektabilität bei gleichzeitiger Darbietung eines unspezifischen Begleitreizes (vgl. Welch & Warren, 1986). Es wird jedoch diskutiert, ob jene frühe sensorische Beeinflussung nicht vielmehr eine Antwortverzerrung reflektiert (z.B. Odgaard et al., 2003).

Modell B. Das am häufigsten zugrunde gelegte Integrationsmodell nimmt eine Feedforward Konvergenz an (s. Abbildung 6-1B): Sinneseindrücke werden getrennt verarbeitet und konvergieren zu einer Wahrnehmung, die sich aus der Summe der gewichteten Empfindungen zusammensetzt (z.B. Shimojo & Shams, 2001; Driver & Spence, 2000; Massaro, 1999).

Dabei tragen nicht notwendigerweise beide Modalitäten gleich zur Gesamtwahrnehmung bei. Je nachdem, welche Modalität mit stärkerer Gewichtung in die Summe eingeht und demzufolge die Gesamtwahrnehmung verzerrt, bezeichnet die dominante Modalität (*engl.* capture). Die Größe und Richtung der intersensorischen Verzerrung hängt von der Gewichtung der Einzelmodalitäten ab. Es finden sich unterschiedliche Ansätze, die die Auswahl der Gewichte hinsichtlich der relativen Dominanz einer Modalität über die andere beschreiben. Freides (1974) vertrat die Ansicht, dass die „erfahrenste“ (*engl.* adept) Modalität dominiert, d.h. dass in Abhängigkeit der Reizparameter und Aufgabenkomplexität eine unterschiedliche Spezialisierung der Modalitäten erfolgte und daraus resultierend die eine Modalität über die andere bevorzugt wird.

Welch & Warren (1980; 1986) nehmen darüber hinaus an, dass die beteiligten Sinne die Informationen nicht nur unterschiedlich präzise aufnehmen können, sondern auch unterschiedlich gut geeignet sind: Die für eine spezifische Aufgabe geeignetere der beiden Modalitäten bestimmt ihre Gewichtung innerhalb der Gesamtwahrnehmung. Da diese Annahmen die Befunde nicht vollständig erklären können, nahmen Welch & Warren (1980) zusätzlich an, dass das perzeptuelle System bestrebt ist, das Wahrgenommene konsistent und einheitlich zu rekonstruieren. Die Modalitäten unterscheiden sich bzgl. ihrer „appropriateness“ (Welch & Warren, 1980, p. 663): Bei der Wahrnehmung räumlicher Faktoren ist die visuelle Modalität die geeignetste (s. auch Calvert, Brammer & Iversen, 1998), während bei der Wahrnehmung zeitlicher Faktoren die auditive Modalität die geeignetste ist. Die Geeignetheit wiederum bestimmt, auf welche der Modalitäten mehr Aufmerksamkeit gerichtet wird und welche somit stärker in die Gewichtung eingehen. Verringert sich die Wahrscheinlichkeit, dass modalitätsspezifische Reize von einer Quelle ausgehen und vergrößert sich die Diskrepanz zwischen ihnen, können Sinneseindrücke nicht mehr zu einer Gesamtempfindung integriert werden.

Warren & Rossano (1991) konkretisieren den Ansatz: Vorhersagen über die Dominanz einer Modalität über die andere können getroffen werden, wenn die Beziehungen zwischen aufgabenrelevanten und sensorischen Eigenschaften untersucht werden. Bei guter Übereinstimmung ist die Qualität der Wahrnehmung gut; überwiegt dabei die Auflösungsgenauigkeit eines Sinnes, so wird dieser mit einer stärkeren Gewichtung an der Gesamtwahrnehmung beitragen.

Guest & Spence (2003a) kritisieren die Ungenauigkeit der Definition von *appropriateness*: Es könnte sich hierbei auch um ein allgemeines Wahrnehmungsprinzip in dem Sinne handeln, dass bei spezifischen Aufgaben, wie z.B. Texturbewertung, die geeignetere Modalität zwar Haptik ist (s. Welch & Warren, 1980), aber der Aufgabentyp determiniert, welche Modalität zur Aufgabenbewältigung ökologisch höher valide ist (vgl. auch Gephstein & Banks, 2003; Calvert et al., 1998). Sie legen eine stärkere Betonung auf die Rolle der Aufmerksamkeit (z.B. Guest & Spence, 2003b) und nehmen an, dass der relative Beitrag einer Sinnesmodalität an der integrierten Gesamtempfindung hauptsächlich abhängig von der Zuwendung von Aufmerksamkeit ist. Erste Befunde von Helbig & Ernst (2004) deuten darauf hin, dass Aufmerksamkeit erst nach der Konvergenz der Information eine Rolle spielt, d.h. Integration präattentativ erfolgt.

Ein weiterer Ansatz ist die Annahme, dass sensorische Informationen aus der Umwelt so verknüpft werden, dass eine bestmögliche Schätzung der Realität entsteht (z.B. Driver & Spence, 2000). Das Fuzzy-Logic-Modell von Massaro (1999) bietet einen einflussreichen Zugang (s. auch Massaro & Friedman, 1990). Ernst & Banks (2002) gehen davon aus, dass die bestmögliche Schätzung der Realität von der Reliabilität abhängt, mit der innerhalb einer Modalität ein spezifischer Stimulus verarbeitet wird (z.B. Ernst & Bühlhoff, 2004). Bei fehlender Verzerrung zwischen den Modalitäten sollte nach der Maximum-Likelihood-Theorie die Modalität den stärksten Beitrag an der Gesamtwahrnehmung tragen, deren Reliabilität am höchsten ist (z.B. Ernst & Banks, 2002). Diese statistisch optimale Integration bedeutet, dass multimodale Integration die Reliabilität der Reaktion auf einen Stimulus erhöht, d.h. die mul-

timodale Varianz (ermittelt über den DL) gegenüber der unimodalen verringert ist. Wird nun die Reliabilität einer Modalität reduziert, d.h. tritt (unkorreliertes) Rauschen auf, verändert sich die Reliabilität der verrauschten Modalität und damit ihre Gewichtung an der Gesamtwahrnehmung. Ist der Fehler nicht unabhängig vom dargebotenen Reiz, reduziert sich zwar die Reliabilität der multisensorischen Empfindung und verändert sich die Gewichtung, jedoch ist der Effekt nicht so konsistent wie bei orthogonalem Fehler (vgl. Oruç, Maloney & Landy, 2003). Dieser Unterschied könnte möglicherweise auf unterschiedliche zugrunde liegende Integrationsmechanismen zurückzuführen sein (vgl. Hillis, Ernst, Banks & Landis, 2002). Das Modell wurde mehrfach bei intersensorischer Integration (z.B. Bresciani, Dammeier & Ernst, 2006; Adams, Graf, & Ernst, 2004; Ernst & Banks, 2002) und intrasensorischer Integration bestätigt (z.B. Drewing & Ernst, 2006; Hillis, Watt, Landy & Banks, 2004; Knill & Saunders, 2003).

Modell C. Zusätzliche Feedback-Bahnen können angenommen werden (s. Abbildung 6-1C): Verarbeitete, bereits konvergierte Informationen beeinflussen über eine Feedback-Schleife die unimodale Verarbeitung (z.B. Macaluso, Frith & Driver, 2000; Giard & Peronnet, 1999; Calvert et al., 1997). Möglicherweise könnte diese Verschaltung dazu führen (vgl. Driver & Spence, 2000), dass sich beispielsweise beim McGurk-Effekt²⁴ die nur auditiv dargebotenen Phoneme von den Phonemen unterscheiden, die auditiv mit abweichender visueller Darstellung, also konfliktbehaftet, präsentiert wurden (s. McGurk & McDonald, 1976).

Zwischen diesen Modellen empirisch unterscheiden zu können, fällt jedoch schwer, da v.a. die Wahl von adäquaten Maßen eines der Hauptprobleme darstellt (z.B. Vroomen & De Gelder, 2004). Die Modelle gegeneinander zu testen, kann und soll in dieser Arbeit nicht geleistet werden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass Informationen vorwärtsgerichtet kombiniert werden und der relative Beitrag der einzelnen Modalitäten an der Gesamtwahrnehmung von unterschiedlichen Faktoren wie Aufmerksamkeit oder Reliabilität beeinflusst werden kann.

6-2-2 Voraussetzungen für Integration

Nach Welch & Warren (1986) ist die intersensorische Verzerrung abhängig von strukturellen Faktoren (wie groß ist die Diskrepanz? ist die Bewegung aktiv oder passiv?), kognitiven Faktoren und Reaktionsvariablen. Werden Reize als von einer Quelle kommend wahrgenommen, erhöht sich das Ausmaß der Verzerrung (kognitive Faktoren); dieses Phänomen bezeichnen Welch & Warren (1986) als „compellingness“ (p. 21). Integration erfolgte, selbst wenn die Teilnehmer aufgeklärt (z.B. Pick & Warren, 1969; Warren & Rossano, 1991) oder instruiert wurden, auf eine Modalität stärker zu achten (z.B. Lederman & Abbott, 1981; Miller, 1972; Myers et al., 1981). Erst, wenn die räumliche Diskrepanz zu groß wird, findet keine Integration mehr statt bzw. reduziert sich (z.B. Gepshtein, Burge, Ernst & Banks, 2005; Helbig & Ernst, in press): Bei zunehmender Diskrepanz nimmt auch die statistische Optimalität der Integration ab (z.B. Gepshtein et al., 2005).

²⁴ Dieses audiovisuelle Phänomen, welches beispielsweise bei der Synchronisierung fremdsprachiger Filme desgleichen zu beobachten ist, ist gekennzeichnet von visueller Dominanz über das auditive Sprachsignal (z.B. Munhall & Vatikiotis-Bateson, 2004): Der bimodale Konflikt wird beim McGurk-Effekt jedoch i. d. R. nicht durch eine Verschiebung der Wahrnehmung (bzw. einer stärkeren Gewichtung der einen Modalität über die andere) gelöst, d.h. einer Kombination der Wahrnehmung (/da/ + /ba/ = /dba/), sondern durch eine Signalverschmelzung (bzw. Fusion). Probanden identifizieren die visuell über eine Videoaufzeichnung präsentierte (/ga/), jedoch auditiv inkongruente Silbe (/ba/) als neue Silbe (/da/). Audiovisuelle Fusion tritt nach Bertelson & De Gelder (2004) dort auf, „where the percept is different from both the auditory and the visual input“ (p. 146).

Allgemeine Voraussetzung für Integration ist räumliche und zeitliche Koinzidenz; geringe räumliche Abweichungen und Latenzen sind jedoch kompensierbar (vgl. Bresciani et al., 2005; Calvert, Campbell & Brammer, 1999; Calvert et al., 1998; Welch & Warren, 1986). Auch andere neuronale Prinzipien multisensorischer Integration im Colliculus Superior (s. Abschnitt 6-1-1) lassen sich auf Verhaltensebene nachweisen, wie z.B. Superadditivität (z.B. Calvert et al., 1998).

Zeitliche und räumliche Kontiguität beeinflussen jedoch nicht stets in gleichem Maße die Integration multisensorischer Informationen: Gerade beim Vergleich des McGurk- (s. Fußnote 24) und des Ventriloquist-Effekts²⁵ wird deutlich, dass vermutlich noch andere Prozesse eine Rolle spielen (vgl. Calvert et al., 1997). Während der McGurk-Effekt relativ robust gegenüber zeitlicher und räumlicher Verzerrung ist (z.B. Munhall, Kroos, Jozan & Vatikiotis-Bateson, 2004; Munhall & Vatikiotis-Bateson, 2004; Van Wassenhove, Grant & Poeppel, 2002; Munhall, Gribble, Sacco & Ward, 1996), führen sie zu einer Reduktion des Ventriloquist-Effekts (vgl. Woods & Recanzone, 2004; Alais & Burr, 2004; Jack & Thurlow, 1973). Möglicherweise spielen also gerade bei der Beteiligung visueller Informationen die Verarbeitungswege (Was- vs. Wo-Bahn) eine Rolle: Der McGurk-Effekt verlangt eine Identifikation der Phoneme (Was-Bahn), der Ventriloquist-Effekt beinhaltet eine Lokalisationsaufgabe und spricht damit die Wo-Bahn an (vgl. Calvert et al., 1997; Rossetti, Rode & Boisson, 1995). Eine andere Erklärungsmöglichkeit liefert das Einbeziehen einer Feedback-Schleife.

Integration führt darüber hinaus nicht notwendigerweise zum Verlust unimodaler Information (z.B. Hillis et al., 2002). Intra- oder intersensorische Integration unterscheidet sich bzgl. der Zugänglichkeit der einzelnen Reizkomponenten nach Integration: Hillis et al. (2002) fanden automatische intrasensorische, nicht aber automatische intersensorische Integration (vgl. Drewing & Ernst, 2006; Knill & Saunders, 2003; Oruç et al., 2003; Robles-De-La-Torre & Hayward, 2001).

Die wichtigste Voraussetzung für Integration ist neben der Interpretationsmöglichkeit, dass beide Modalitäten von ein und derselben Quelle kommen, die relative zeitliche und räumliche Kongruenz. Absolute Kongruenz ist nicht notwendig: Konflikte zwischen den Modalitäten bleiben oft unbemerkt und werden zugunsten einer Modalität (der dominanten) gelöst; darauf wird in Abschnitt 6-3 eingegangen.

6-2-3 Untersuchung von Integration

Es existieren unterschiedliche Ansätze, über die die multisensorische Integration erforscht werden kann. Das Hauptparadigma schlägt zur Erforschung der Integration das Herstellen intermodaler Konflikte vor. Als ähnlich wichtig wird das Vergleichsparadigma angesehen, das v.a. zur Überprüfung multisensorischer Überlegenheit gegenüber unimodaler Darbietung herangezogen wird.

Konfliktparadigma. Multisensorische Integration wird fast ausschließlich über das experimentelle Erzeugen intersensorischer Konflikte untersucht: Die resultierende Wahrnehmung zeigt trotz Diskrepanzen eine Integration zu einem kohärenten Bild. Diese Konflikte resultieren also entweder in sofortiger Reaktion auf die induzierte Diskrepanz (im Sinne einer Reduktion) oder bleiben auch längerfristig in Form von Nacheffekten nach Adaptation erhalten

²⁵ Beim Ventriloquist-Effekt zeigt sich visuelle Dominanz über die Lokalisierung des auditiven Signals: Die Richtung, aus der das auditive Signal tatsächlich kommt, stimmt nicht mit dem visuellen Signal überein, dennoch wird das visuelle Signal für die ursprüngliche Quelle gehalten (vgl. Howard & Templeton, 1966; Woods & Recanzone, 2004; Vroomen & De Gelder, 2004; Stein & Meredith, 1993; Radeau & Bertelson, 1987). Dieser Effekt wirkt nicht nur bei dem Bauchredner (*engl.* ventriloquist) und seiner Puppe, sondern auch z.B. im Kino, wo der visuelle Input vor dem Beobachter auf der Leinwand ist, der auditive Input jedoch aus mehreren im Raum verteilten Lautsprechern kommt.

(z.B. Welch, Widawski, Harrington & Warren, 1979). Die zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse unterscheiden sich für beide Arten induzierter Konflikte; da Adaptation nicht Gegenstand der im Folgenden berichteten Untersuchungen sein wird, wird auf eine nähere Beschreibung des Phänomens verzichtet.

Durch intersensorische Verzerrung während der Präsentation und daher kurzfristig, entstandene Konflikte können, wie bereits angedeutet (s. Abschnitt 6-2-2), in solche untergliedert werden, bei denen räumliche, zeitliche oder inhaltliche intersensorische Diskrepanzen entstehen (z.B. der Ventriloquist-Effekt). Eine Veränderung der Gesamtwahrnehmung aufgrund inhaltlicher Diskrepanzen wird beim erwähnten McGurk-Effekt sichtbar (vgl. auch: Saldaña & Rosenblum, 1993; auditiv-haptisches Äquivalent: Guest, Catmur, Lloyd & Spence, 2002; Jousmäki & Hari, 1998).

Vergleichsparadigma. Die einfachste Art, Integration zu testen, besteht nach Welch & Warren (1986) darin, die unisensorische Wahrnehmung mit der multisensorischen zu vergleichen. Wird eine weitere Modalität hinzugefügt, kann die Veränderung in der Gesamtwahrnehmung auf „the properties that the second modality adds to those of the first modality, in relation to the observer’s distribution of attention and the characteristics of the task“ (Warren & Rossano, 1991, p. 131) zurückgeführt werden.

Nach De Gelder & Bertelson (2003) ist es außerdem sinnvoll, bei der Untersuchung intermodaler Diskrepanzen die Verarbeitungsebene einzubeziehen: Integration kann erzwungen erfolgen und demzufolge nicht mehr detektierbar sein (vgl. McGurk-Effekt) oder es können neben der multisensorischen Empfindung auch die Einzelempfindungen noch zugänglich sein (vgl. Hillis et al., 2002). Bei letzteren sind kognitive Prozesse beteiligt, während erstere v.a. wahrnehmungstriggert sind (vgl. Bertelson & De Gelder, 2004). In Anlehnung an die von Essock (1980) eingeführte Unterscheidung in Effekte der Klasse 1 (Wahrnehmung) und Klasse 2 (Beteiligung von Kognition) wird im Folgenden zwischen Klasse 1- und Klasse 2-Diskrepanzen unterschieden. Ein Großteil der Forschung der letzten Dekaden beschäftigte sich mit Klasse 2-Diskrepanzen bei z.B. verbalen Einschätzungen, Zeigeverhalten oder Matching.

Methoden zur Bestimmung von Klasse 1- Diskrepanzen werden aus der Psychophysik herangezogen und adaptiert, während Methoden zur Bestimmung von Klasse 2- Diskrepanzen meist die Auswahl eines adäquaten Reizes (Matching), aber auch (aufgabenabhängig) das Reproduzieren des Wahrgenommenen verlangen (z.B. durch Wiedereinnehmen der Position wie bei den Untersuchungen zur Lokalisierung, durch Zeichnen wie z.B. bei Rock & Victor, 1964).

Psychophysische Methoden. Ein zusätzlicher Ansatz beschäftigt sich mit der Frage, wie diskrepante Informationen wahrgenommen werden, d.h. welcher kongruente Stimulus gerade nicht mehr von dem diskrepanten Standard unterschieden werden kann (s. Ernst & Banks, 2002). Diese multisensorische Wahrnehmung wiederum erfolgt nach der MLE-Theorie aus der von der Reliabilität abhängigen Gewichtung der Einzelmodalitäten varianzminimierend.

Aus der Herstellungsmethode entwickelte sich das Verfahren des cross-modalen Matching, wobei hier, wie in Abschnitt 3-3 bereits zusammengefasst, der Proband gebeten wird, seine Empfindung aus der einen Modalität (z.B. die Helligkeit eines Lichts) in der anderen (z.B. die Lautheit eines Tons) so einzustellen, dass die Intensität subjektiv gleich ist. Ziel des cross-modalen Matchings ist, Aussagen über die Übertragbarkeit physikalischer Dimensionen (wie z.B. Intensität) zwischen den Modalitäten zu treffen.

Weitere Methoden. Von cross-modalem Matching zu unterscheiden sind Matching-Paradigmen: Dem Proband werden intermodal diskrepante Reize dargeboten. Der subjektiv adäquat wahrgenommene Vergleichsreiz wird entweder in einer der beiden Modalitäten („unimodales Matching“, z.B. Rock & Victor, 1964) oder in beiden Modalitäten zusammen („bimodales Matching“, z.B. Kinney & Luria, 1970) ausgewählt. Unimodales Matching wiederum führt häufig zu einer Reaktionsverzerrung, die evtl. von einem Einfluss sensorischer Dominanz nicht getrennt werden kann (vgl. Heller, Calcaterra, Green & Brown, 1999; Hershberger & Misceo, 1996; Warren, 1980). Um dies zu umgehen, schlägt Welch & Warren (1986) vor, eine „amodal indicator response“ (p. 22) zu finden. Eine derartige Möglichkeit besteht darin, Probanden eine verbale Einschätzung vornehmen zu lassen. Magnitude Estimation intermodal diskrepanter Reize erlaubt zumindest nach Hershberger & Misceo (1996) nicht notwendigerweise eine Aussage über sensorische Dominanz.

6-3 Intermodale visuell-haptische Integration

Der Einfluss visuell-haptischer Diskrepanzen auf die Gesamtwahrnehmung sowie die Befunde zur Gewichtung der Einzelmodalitäten und der daraus resultierenden Dominanz einer Modalität werden in Abschnitt 6-3-1 vorgestellt. Welche Faktoren sensorische Dominanz reduzieren können, wird in Abschnitt 6-3-2 zusammengefasst. Über Befunde zu Grenzen der Wahrnehmung wird in Abschnitt 6-3-3 berichtet.

6-3-1 Visuell-haptische Diskrepanzen und sensorische Dominanz

Multisensorische Integration wird besonders dort deutlich, wo physikalische Inkongruenzen bestehen. Viel wurde im Bereich visuell-auditiver Diskrepanzen und deren Einfluss auf die Wahrnehmung geforscht (für eine Übersicht s. Calvert, Spence & Stein, 2004), doch auch die Forschung zu visuell-haptischen Diskrepanzen hat eine lange Tradition.

Einfluss visuell-haptischer Konflikte wurde in folgenden Bereichen untersucht:

- bei der räumlichen Lokalisierung eines Reizes, d.h. Bewegung auf ein Ziel hin (z.B. Spence, Pavani & Driver, 2004; Pavani, Spence & Driver, 2000; Ferrel, Leiffen, Orliaguet & Coellos, 2000; Van Beers, Sittig & Denier van der Gon, 1999, 1996; Lederman & Abbott, 1981; Warren, 1980; Welch et al., 1979; Warren & Schmidt, 1978; Warren & Pick, 1970; Rock & Harris, 1967; in VR: z.B. Klatzky, Lederman & Langseth, 2003; Wall, Paynter, Shilito, Wright & Scali, 2002),
- zur Wahrnehmung geometrischer Eigenschaften, d.h. Größe resp. Länge (z.B. Kumazaki, Terade & Ito, 2007; Gephstein & Banks, 2003; Heller et al., 1999; Misceo, Hershberger & Mancini, 1999; Hershberger & Misceo, 1996; Jones, 1983; Power, 1981; Fishkin, Pishkin & Stahl, 1975; Miller, 1972; McDonnell & Duffett, 1972; Kinney & Luria, 1970; Rock & Harris, 1967; Rock & Victor, 1964; Kelvin, 1954; Raffell, 1936; in VR: z.B. Wuillemin, Van-Doorn, Richardson & Symmons, 2005),
- zur Form (z.B. Helbig & Ernst, 2007; Heller, 1992; Heller, 1983),
- zur Kurvigkeit (z.B. Easton & Moran, 1978; Easton, 1976).
- zur Neigung (z.B. Rosas, Wagemanns, Ernst & Wichmann, 2005; Gepshtein et al., 2005;

Ernst, Banks & Bühlhoff, 2000; Lechelt & Verenka, 1980; Fishkin et al., 1975; Appelle, 1971; Over, 1966),

Daneben wurde auch der Einfluss intersensorischer Diskrepanzen bei der Wahrnehmung von Materialeigenschaften untersucht: Besonders im Vordergrund der Forschungstätigkeiten stand

- die Objekteigenschaft Textur (z.B. Drewing, Ernst, Lederman & Klatzky, 2004; Cinel, Humphreys & Poli, 2002; Guest & Spence, 2003a, b; Lederman, Thorne & Jones, 1986; Heller, 1985; Jones & O'Neill, 1985; Heller, 1982; Lederman & Abbott, 1981; Fishkin et al., 1975; in VR: z.B. Poling, Weisenberger & Kerwin, 2003),
- während andere Materialeigenschaften wie z.B. Härte bisher kaum Beachtung fanden (in VR: Lécuyer, Burkhardt, Coquillart & Coiffet, 2001; Wu, Basdogan & Srinivasan, 1999; Srinivasan, Beaugard & Brock, 1996).

Menschen sind in der Lage trotz räumlicher Diskrepanzen die visuellen und haptischen Informationen zu integrieren sowie trotz z.B. Verzerrung der visuellen Darstellung durch Prismen ein kongruentes Abbild der Umgebung oder des Objektes zu rekonstruieren (vgl. Abschnitt 6-2). Dabei dominiert häufig eine Modalität die Gesamtwahrnehmung. Meist findet sich eine Verzerrung der Gesamtwahrnehmung in Richtung der visuell dargestellten Information: Dies trifft zu bei Aufgaben zur räumlichen Lokalisierung, sowie der Wahrnehmung geometrischer Eigenschaften wie Größe resp. Länge, Kurvigkeit oder Neigung (z.B. Kumazaki et al., 2007; Spence et al., 2004; Hillis et al., 2004; Pavani et al., 2000; Ferrel et al., 2000; Ernst et al., 2000; Misceo et al., 1999; Over, 1966; Jones, 1983; Power, 1981; Welch et al., 1979; Easton & Moran, 1978; Fishkin et al., 1975; Easton, 1976; Miller, 1972; Uhlarik & Canon, 1971; Kinney & Luria, 1970; Pick & Warren, 1969; Rock & Victor, 1964; Raffell, 1936). Visuelle, konfliktbehaftete Rückmeldung kann auch die visuell-haptische Wahrnehmung von Objektgröße beeinflussen (Wu et al., 1999; Srinivasan et al., 1996).

Haptische Dominanz lässt sich ebenfalls, wenn auch wesentlich seltener, zeigen und ist in ihrem Ausmaß geringer (z.B. Heller, 1983): Die haptische Wahrnehmung kann beispielsweise die visuell-haptische Wahrnehmung von Textur dominieren (z.B. Poling et al., 2003; Guest & Spence, 2003a; Cinel et al., 2002; Ernst et al., 2000; Fishkin et al., 1975).

Gerade am Beispiel der Texturwahrnehmung lässt sich die Uneinheitlichkeit der Befunde zur Dominanz zeigen: Neben haptischer Dominanz konnten auch einige Studien visuelle Dominanz nachweisen (z.B. Poling et al., 2003; Cinel et al., 2002; Heller, 1985, 1982; Lederman & Abbott, 1981). Keine Dominanz der visuellen oder haptischen Modalitäten wurde ebenfalls in einigen Untersuchungen gefunden (z.B. Drewing et al., 2004; Lederman et al., 1986; Jones & O'Neill, 1985; Lederman & Abbott, 1981; für einen Überblick s. Lederman & Klatzky, 2004).

In einigen anderen Bereichen wurde desgleichen keine sensorische Dominanz gezeigt, d.h. beide Modalitäten tragen gleichermaßen zur Gesamtwahrnehmung bei. Dies traf zu bei der Wahrnehmung der geometrischen Eigenschaften Größe / Länge oder Neigung, aber auch bei Aufgaben zur räumlichen Lokalisierung (z.B. Rosas et al., 2005; Gephstein & Banks, 2003; Heller et al., 1999; Van Beers et al., 1999; Hershberger & Misceo, 1996; Warren, 1980; Warren & Schmidt, 1978; Fishkin et al., 1975; McDonnell & Duffett, 1972; Appelle, 1971; Kelvin, 1954). Andere Forscher berichten auch von interindividuellen Unterschieden bezüglich der dominierenden Modalität (vgl. McDonnell & Duffett, 1972).

Wie bereits in Abschnitt 2-3 angedeutet, kann die Verfügbarkeit sensorischer Informationen zu einer Erleichterung wahrnehmbarer Objekteigenschaften führen: Bei rein haptischer Exploration werden Materialeigenschaften wie Textur oder Härte, bei bimodal visuell-haptischer Exploration geometrische Eigenschaften wie Objektgröße stärker gewichtet (vgl. Lederman,

Summers & Klatzky, 1996; Klatzky, Lederman & Matula, 1993). Darüber hinaus zeigten Klatzky et al. (1987), dass die Wahrnehmung der Objektform bei rein haptischer, Härte bei visuell-haptischer Exploration, und Größe bei beiden Explorationsarten erschwert ist. So erscheint es nicht weiter verwunderlich, dass haptische Dominanz eher bei der Materialeigenschaft Textur auftritt, während visuelle Dominanz, bzw. keine eindeutige Bevorzugung einer Modalität, bei der geometrischen Eigenschaft Größe (Länge) gefunden wird (vgl. Welch & Warren, 1986).

6-3-2 Einflussfaktoren auf sensorische Dominanz

Sensorische Dominanz wird auch von anderen Faktoren als der interindividuellen Präferenz (vgl. Heller, 1992; McDonnell & Duffett, 1972) beeinflusst: Alter (z.B. Misceo et al., 1999; Connolly & Jones, 1970; nicht: Warren & Pick, 1970), Sicht der Hand bei visueller Verzerrung durch Prismen (z.B. Heller et al., 1999; nicht: Ferrel et al., 2000; Miller, 1972), Darbietung der Reize in der kontralateralen Hemisphäre reduzieren die visuelle Gewichtung (z.B. Warren, 1980; Spence et al., 2004).

Auch unvollständige visuelle Information (z.B. Ferrel et al., 2000; Uhlarik & Canon, 1971) oder Maskierung visueller Cues (z.B. Kumazaki et al., 2007; Helbig & Ernst, 2007; Heller et al., 1999; Fishkin et al., 1975) verringern die Dominanz visueller Information. Aufmerksamkeitsrichtung (vgl. Spence et al., 2004; Posner, Nissen & Klein, 1976) sowie Variationen in der Instruktion bzgl. der zu beachtenden Dimension (z.B. Lederman et al., 1986; Miller, 1972) können die visuelle Dominanz beeinflussen, während trotz Hinweis auf die visuell-haptische Diskrepanz der Einfluss visueller Information auf die Gesamtwahrnehmung bestehen bleibt (z.B. Klatzky et al., 2003; Easton & Moran, 1978; vgl. außerdem Misceo et al., 1999).

Aufgabenirrelevante, aber räumlich oder zeitlich nahe Distraktoren (z.B. Patchay, Castiello & Haggard, 2003) oder korrelierte Informationen können nicht ignoriert werden (z.B. Cinel et al., 2002). Als ein Grund für auftretende Dominanzeffekte wird z.B. bei räumlichen Lokalisierungsaufgaben die Adaptation an die durch Prismen induzierte Verzerrung diskutiert (z.B. Rock & Harris, 1967): Eine Veränderung des Kontextes durch eine Erhöhung nichtdiskrepanter Trials tilgt den Dominanzeffekt (vgl. Warren & Schmidt, 1978).

Modalitätsdominanz scheint auch abhängig von der Reizauswahl (vgl. Patchay et al., 2003; Poling et al., 2003; Gepshtein & Banks, 2003; Heller et al., 1999; Heller, 1985; Cohen, 1981). Beispielsweise überwiegt die Gewichtung der Sicht bei bimodaler Texturwahrnehmung nur, wenn die Texturen visuell leichter diskriminierbar sind (vgl. Poling et al., 2003; Heller, 1985). Klatzky et al. (1993) zeigten, dass Menschen bei Eigenschaften, die visuell leicht zu unterscheiden sind, sich beim Explorieren vornehmlich auf die Sicht verlassen. Sind hingegen die Unterschiede visuell schwer wahrnehmbar (wie meist bei Materialeigenschaften), steigt die Bedeutung haptischer Exploration. Auch bei erzwungener schneller Diskriminierung von Texturen zeigte sich haptische Dominanz (vgl. Guest & Spence, 2003b); dabei wurde v.a. die visuelle Wahrnehmung der Texturen durch inkongruente haptische Reize beeinträchtigt.

Den meisten der oben genannten Studien liegen Aufgaben zugrunde, die Matching oder Reproduzieren des Referenzreizes verlangen (z.B. Kumazaki et al., 2007; Klatzky et al., 2003; Ferrel et al., 2000; Heller et al., 1999; Van Beers et al., 1996; Lechelt & Verenka, 1980; Easton & Moran, 1978; Fishkin et al., 1975; Connolly & Jones, 1970). Wie bereits erwähnt, wird häufig gerade bei Studien zum Matching ein Einfluss der Reaktionsmodalität berichtet (z.B. Hershberger & Misceo, 1996; Warren, 1980; Connolly & Jones, 1970).

Besonders bei diesen Aufgaben werden kognitive Fähigkeiten nötig, d.h. Memorieren und Übertragen der Information von der einen in die andere Modalität (vgl. Connolly & Jones, 1970; Lechelt & Verenka, 1980; Milewski & Iaccino, 1982). Somit ist es wenig verwunderlich, dass beim multimodalen Matching die Genauigkeit häufig hinter der beim unimodalen Matching zurückbleibt (vgl. Lechelt & Verenka, 1980; Salmoni & Sullivan, 1976; Connolly & Jones, 1970; Cashden, 1968; Björkman, 1967; nicht: Woods, O'Modhrain & Newell, 2004; Appelle, 1971).

Andere Studien untersuchen den Einfluss visuell-haptischer Diskrepanzen bei Diskriminierungsaufgaben (vgl. Rosas et al., 2005; Guest & Spence, 2003a; Gephstein & Banks, 2003; Srinivasan et al., 1996; Jones & O'Neill, 1985; Easton & Moran, 1978; Appelle, 1971). Der Einfluss konfliktbehafteter Darstellung auf die Empfindung wurde auch durch direkte Skalierungsmethoden erfasst (z.B. Drewing et al., 2004; Jones, 1983). Bei diesen Untersuchungen werden kaum andere Performanzvariablen als die Genauigkeit zur Bestimmung des Dominanzeffektes herangezogen. Visuelle Dominanz zeigt sich jedoch z.B. auch durch erhöhte Kraftaufwendung beim Entlangfahren einer haptisch geraden, visuell kurvigen Linie, besonders am Minimum der Kurve (vgl. Easton, 1976). Auch die Greifspanne kann durch einen haptischen Distraktor beeinflusst werden (vgl. Patchay et al., 2003).

6-3-3 Grenzen der Integration

Wie im Abschnitt 6-3-1 gezeigt, werden Konflikte zwischen Modalitäten nicht immer wahrgenommen und trotz physikalischer Inkongruenz integriert, um eine kohärente Wahrnehmung der Umgebung zu gewährleisten. Anders formuliert werden innerhalb schmäler Grenzen physikalischer Inkongruenz diese visuell-haptischen Diskrepanzen vom Menschen nicht wahrgenommen (vgl. Marks, 2004).

Liegt die Diskrepanz unterhalb der Wahrnehmungsschwelle, können die physikalischen Abweichungen der sensorischen Informationen selbst dann nicht voneinander unterschieden werden, wenn auf den Konflikt hingewiesen wurde (z.B. Lederman & Abbott, 1981; Myers et al., 1981; Miller, 1972) oder die Aufmerksamkeit gezielt auf eine der beiden Modalitäten bei bimodaler Darstellung gerichtet wurde (z.B. Massaro, 1987).

Das direkte Erheben der Grenzen, d.h. ab welcher physikalischen Inkongruenz der bimodale Konflikt wahrgenommen werden kann, ist dem Autor nicht bekannt. Lediglich Srinivasan et al. (1996) untersuchten den Einfluss zunehmender visueller Diskrepanz auf die Fähigkeit, den Unterschied von Objekten wahrzunehmen, deren Nachgiebigkeit sich deutlich fühlbar voneinander unterschied. Lag das Verhältnis visueller zu haptischer Darstellung mehr als 50% auseinander, verschlechterte sich die Performanz der Probanden: Zuvor korrekt identifizierte Unterschiede konnten dann nicht mehr wahrgenommen werden.

7 TEIL III INTERMODALE INTERAKTION – INTEGRATIONS- GRENZEN UND SENSORISCHE DOMINANZ

„We propose that intersensory bias is one result of the attempt by the perceptual system to maintain normal perception in the face of intersensory discrepancy. [...] Within certain limits, this attempt may be completely successful, with bias occurring with no accompanying realization of the discrepancy. Outside of those limits [...] bias may still occur, but since the perceptual system is not flexible enough to completely integrate the conflicting information, realization of the discrepancy occurs [...].”

(Welch & Warren, 1980, p.639)

Werden Sicht und Haptik in TPTA-Systemen kombiniert, stellen sich aufgrund der im vorigen Kapitel zusammengefassten Erkenntnisse zur visuell-haptischen Forschung für die in dieser Arbeit relevanten Parameter Objektnachgiebigkeit und Objektkanten folgende Fragen:

- 1) Führt bimodale gegenüber unimodaler Darbietung zu einem überlegenen menschlichen Auflösungsvermögen?
- 2) Dominiert eine (evtl. die visuelle) Modalität die bimodale Wahrnehmung?
- 3) Wo liegt die Grenze zwischen perzeptueller Kongruenz und detektierbarem intermodalem Konflikt bei bimodaler Wahrnehmung?

Besonders die dritte Fragestellung kann wichtige Hinweise für die Gestaltung der Kommunikation in TPTA-Systemen liefern. Da Menschen nicht alle physikalischen Abweichungen zwischen Modalitäten wahrnehmen können, kann der psychophysische Ansatz zur Datenkompression innerhalb einer Modalität auch auf die Abweichungen zwischen Modalitäten erweitert werden. Dafür müssen jedoch zuerst die Grenzen visuell-haptischer Integration bestimmt und allgemeine Fragen zur Integration beantwortet werden (s. Kapitel 7).

Da TPTA-Systeme unkontrollierbare Beschränkungen bei der Datenübertragung einführen und diese wiederum einen unsystematischen Einfluss auf die experimentellen Ergebnisse haben, wurden die erforderlichen Grundlagenuntersuchungen in einer computergenerierten virtuellen Umgebung durchgeführt.

Grundlegende Voraussetzung für die Integration verschiedener Sinneswahrnehmungen ist v.a. räumliche sowie zeitliche Koinzidenz, auch wenn geringe Diskrepanzen nicht immer wahrgenommen werden. Marks (2004) unterscheidet in diesem Zusammenhang daher zwischen physikalischer und perzeptueller Kongruenz. Physikalische Kongruenz besagt, dass die Stimulusparameter (bezüglich einer Dimension oder Eigenschaft) in beiden Modalitäten tatsächlich physikalisch, d.h. zeitlich und / oder räumlich übereinstimmen müssen. Perzeptuelle Kongruenz hingegen ist ein psychophysisches Konstrukt, das sich auf die Wahrnehmung physikalischer Inkongruenz bezieht: Physikalisch diskrepante Informationen, die als von einem Objekt ausgehend wahrgenommen und interpretiert werden können und deren neuronale Repräsentationen sich demzufolge räumlich und zeitlich überlappen (z.B. Meredith, 2002), werden grundsätzlich integriert, ohne dass die physikalische Inkongruenz detektiert werden kann (s. Marks, 2004). In diesem Fall liegen die intermodalen Abweichungen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

Zahlreiche Forscher haben sich bereits mit dem Einfluss diskrepanter, d.h. physikalisch nicht-kongruenter, Informationen auf die menschliche Wahrnehmung beschäftigt. Besonders starkes Forschungsinteresse hat dabei die Fragestellung hervorgerufen, inwieweit die visuell-haptisch inkongruente Wahrnehmung durch eine dominante Modalität verzerrt wird (s. Kapitel 6-3).

Bisher gibt es jedoch kaum Untersuchungen, wie groß die physikalische Abweichungen zwischen den Modalitäten sein muss, damit der Konflikt zwischen den Sinnen detektiert werden kann. Daher werden am Beispiel von Objektnachgiebigkeit und Objektkanten (s. Abbildung 7-1) in dieser Arbeit die Grenzen der Integration visueller und haptischer Wahrnehmung bestimmt und untersucht, welche der Modalitäten die Gesamtwahrnehmung dabei dominieren.

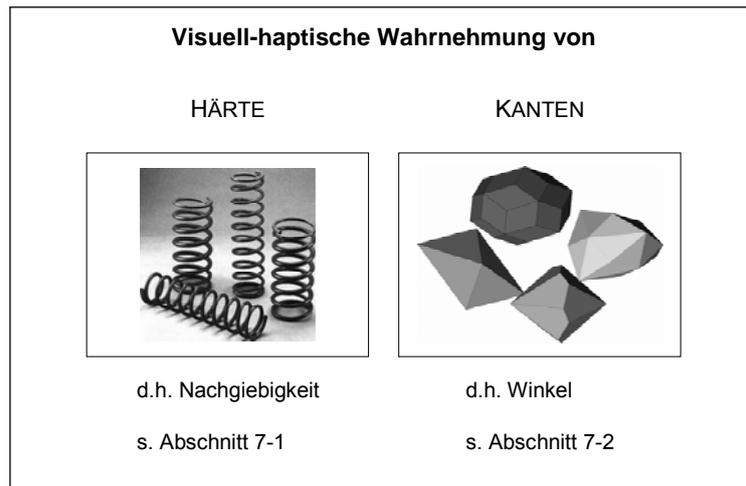


Abb. 7-1 Für relevante Beispiele einer Material- und Geometrie-eigenschaft werden Fragen zur visuell-haptischen Wahrnehmung und den Grenzen der Integration untersucht.

7-1 Multimodale Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit

7-1-1 Theoretischer Hintergrund

Informationen über ein Objekt werden durch unterschiedliche Sinneskanäle aufgenommen und, um das Objekt als Ganzes wahrnehmen zu können, integriert (s. Kapitel 6). Beispielsweise werden bei der visuell-haptischen Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit Informationen aus dem haptischen und visuellen System verarbeitet.

Wie bereits in Abschnitt 2-3 angesprochen, ist für die Informationsaufnahme im haptischen System aktives Explorieren oder Manipulieren des Objektes nötig. Taktile Informationen, entstanden durch Deformation der Fingerspitze, erlauben bei deformierbaren Objekten Aussagen über deren Nachgiebigkeit (z.B. Srinivasan & La Motte, 1995). Besonders jedoch tragen Veränderungen in der Fingerposition sowie die beim Greifen gegen das Objekt aufgewandte Kraft zur Wahrnehmung von Nachgiebigkeit bei (vgl. Srinivasan & La Motte, 1995; Roland & Ladegaard-Pedersen, 1977). Diese Informationen über Kraft und Position müssen kombiniert werden, um Objektnachgiebigkeit (definiert als Kraft proportional zur Position) haptisch wahrnehmen zu können. Das visuelle System erlaubt eine Wahrnehmung der Veränderung der Fingerposition am Objekt über die Zeit. Diese drei Eingangsinformationen, wobei lediglich die Positionsinformationen redundant sind, resultieren in der bimodalen Wahrnehmung eines nachgiebigen Objektes (s. Abbildung 7-2).

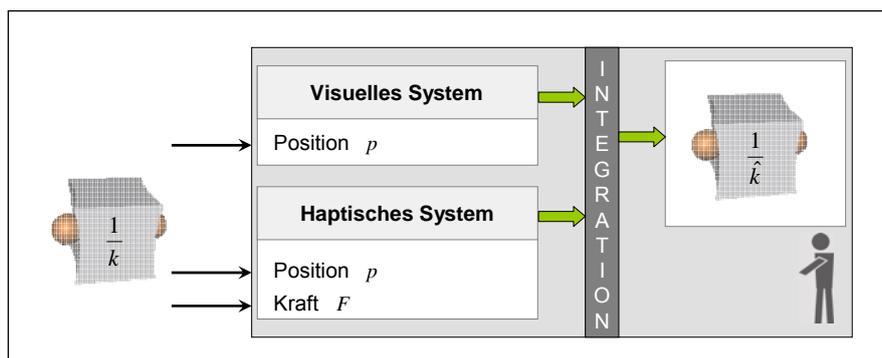


Abb. 7-2 Beim Greifen eines nachgiebigen Objektes werden Informationen über das haptische und das visuelle System aufgenommen. Wie die Informationen kombiniert werden, um die Nachgiebigkeit ($1/k$) wahrnehmen zu können, ist bisher nicht geklärt.

Haptisches System. Das Forschungsteam um Tan (1995, 1993, 1992) zeigte, dass Diskriminierung eines Signals (Fingerabstand, d.h. Position, bei konstanter Kraft oder Kraft bei konstantem Fingerabstand) durch das haptische System höher aufgelöst werden konnte, als wenn gleichzeitig variierende Kraft- und Positionsinformation (Nachgiebigkeit) diskriminiert werden sollten. Die Kombination beider haptischer Einzelinformationen, d.h. eine Integration innerhalb der haptischen Modalität, resultierte in einer reduzierten Diskriminierungsleistung (s. Abschnitt 4-2-1). 8-10% Unterschiede zwischen Kräften (z.B. Yamakawa et al., 2005; Tan et al., 1995; Jones, 1983) und ca. 5% Unterschiede in Fingerabstandsinformationen (z.B. Ernst & Banks, 2002; Durlach et al., 1989; Evans & Howarth, 1966; Langfeld, 1917) können wahrgenommen werden, während mehr als 22% Unterschiede nötig werden, um Nachgiebigkeiten voneinander diskriminieren zu können (z.B. Yamakawa et al., 2005; Tan et al., 1995).

Visuelles System. Darüber hinaus tragen auch über das visuelle System aufgenommene Informationen zur Wahrnehmung der Nachgiebigkeit eines Objektes bei: Der Mensch verfügt jedoch über keinerlei visuelle Kraftrezeptoren. Positionsinformation, d.h. maximale Eindrucktiefe, können visuell diskriminiert werden: Menschen können Unterschiede in der visuellen Länge oder Größe von Objekten hervorragend detektieren: Der (absolute) Fehler ist sehr gering (z.B. Jones & Connolly, 1970; Pollock & Chapanis, 1952; Raffel, 1936; Jastrow, 1886) und nimmt mit dem Alter noch ab (z.B. Connolly & Jones, 1970). Unterschiede von ca. 1-3% in der Linienlänge können noch wahrgenommen werden (z.B. Norman, Todd, Perotti & Tittle, 1996; Kelvin, 1954). Die Weber-Brüche steigen mit variierender Orientierung auf ca. 5% an und hängen zusätzlich vom Abstand zur (midsagittalen) Sichtachse ab (z.B. Norman et al., 1996; Dick & Hochstein, 1988; Pollock & Chapanis, 1952). Eine Beeinflussung der Wahrnehmung in Abhängigkeit der Orientierung der Linie lässt sich besonders bei obliquen Orientierungen (vgl. Appelle, 1972), jedoch auch als Überschätzung vertikaler und Unterschätzung horizontaler Linien nachweisen (z.B. Gepshtein & Banks 2003; Pollock & Chapanis, 1952). Werden parallele Linien horizontal präsentiert, konnten Abweichungen von 4% wahrgenommen werden; die Diskriminierungsleistung verschlechterte sich um das Dreifache (12%), wenn die parallelen Linien vertikal dargestellt wurden (s. Gepshtein & Banks, 2003).

Jedoch kann Nachgiebigkeit eines Objektes auch bei rein visueller Beobachtung geschätzt werden: Wie bereits in Kapitel 1 angedeutet, können Erwartungen die Wahrnehmung beeinflussen (vgl. Anderson, 1996). Reizaufnahme erfolgt nicht nur datenbasiert (bottom-up), sondern auch durch Involvierung von top-down-Prozessen (s. Anderson, 1996). Erfahrung mit einem Objekt kann die Wahrnehmung seiner Attribute stark verändern, wie Ellis & Lederman (1998) bei einer Untersuchung zur Beurteilung des Gewichts unterschiedlicher Golfbälle zeigten: Geübte Golfer wurden durch das Wissen um das Gewicht des Golfballtyps in ihrem Urteil beeinflusst, während Nicht-Golfer die Bälle aufgrund ihres tatsächlichen Gewichts bewerteten (aufgrund fehlenden Wissens über die Schwere typischer Golfbälle waren ihre Urteile unbeeinflusst von Erwartungen).

Bimodale Wahrnehmung. Zur bimodalen Wahrnehmung von Nachgiebigkeit wurden kaum Untersuchungen unternommen: Lécuyer et al. (2001) und Srinivasan et al. (1996) zeigten, dass Variationen der visuellen Modalität die Diskriminierbarkeit verzerrten bzw. beeinträchtigten.

Bimodalität kann zu (neuronaler) Reaktionsverstärkung, dem sog. multisensory response enhancement führen (s. Abschnitt 6-1), solange die Stimulierung temporal und räumlich kongruent erfolgt (vgl. Holmes & Spence, 2005; Meredith, 2002). Reaktionserleichterung in diesem Sinne konnte beispielsweise bezüglich der Reaktionszeit nachgewiesen werden. (z.B. Colonius & Diederich, 2004; Zuidhoek, Visser, Bredero & Postma, 2004; Diederich & Colonius, 1987; für einen Überblick s. Welch & Warren, 1986). Daneben wurde jedoch auch gezeigt, dass die bimodale Gesamtwahrnehmung verlässlicher ist als jede der Einzelwahrnehmungen für sich genommen (z.B. Helbig & Ernst, 2007; Barbagli, Salisbury, Ho, Spence & Tan, 2006; Gepshtein & Banks, 2003; Wall et al., 2002; Jones & O'Neill, 1985; außerdem: Van Beers et al., 1996; Jones, 1983). In Abschnitt 6-3 wurde zusammengefasst, dass dieser relative Beitrag der einzelnen Modalitäten an der Gesamtwahrnehmung von z.B. der Reliabilität der Modalitäten abhängt. Besonders hohe Reliabilität weist, besonders bei räumlichen Objekteigenschaften, oft die visuelle Modalität auf: Sie dominiert dann die Gesamtwahrnehmung (z.B. Power, 1981; Over, 1966; Rock & Victor, 1964). Nicht notwendigerweise jedoch lässt sich immer visuelle Dominanz zeigen: Einige Faktoren wie Art der Aufgabe (z.B. Heller et al., 1999; Hershberger & Misceo, 1996; Warren, 1980) oder Verrauschen einer Modalität (z.B. Ernst & Banks, 2002) reduzieren den Einfluss der visuellen Modalität. Auch haptische Dominanz wird zuweilen, besonders bei Materialeigenschaften, nachgewiesen (z.B. Guest & Spence, 2003a; Ernst et al., 2000).

Nicht immer sind redundante Informationen, aufgenommen über unterschiedliche Sinne, tatsächlich kongruent. Voraussetzung für Integration ist relative zeitliche und räumliche Koinzidenz. Konflikte zwischen den Modalitäten führen demzufolge nicht immer zu einer bewussten Wahrnehmung und scheinen, innerhalb bestimmter Grenzen, sowohl bei temporaler als auch bei räumlicher Diskrepanz kompensierbar zu sein, wie am Beispiel des McGurk- und des Ventriloquist-Effekts in Abschnitt 6-2-2 erläutert wurde. Des Weiteren ist Voraussetzung für Integration, dass die sensorischen Informationen von einer Quelle ausgehend interpretiert werden können; dies erleichtert die Wahrnehmungsorganisation (vgl. Anderson, 1996). Selbst das Wissen um intersensorische Diskrepanz hat oft keinen Einfluss auf die Wahrnehmung (z.B. Warren & Rossano, 1991; Pick & Warren, 1969): Räumlich getrennte Informationen werden integriert, solange von einer gemeinsamen Quelle ausgegangen werden kann (vgl. Helbig & Ernst, in press). Diese Tendenz des sensorischen Systems, wird, wie in Abschnitt 6-2 bereits diskutiert, auf die compelligness der Informationen zurückgeführt (vgl. Welch & Warren, 1986).

Marks (2004) definierte in diesem Zusammenhang physikalische Übereinstimmung redundanter²⁶ Parameter z.B. eines Objekts als physikalische Kongruenz; liegt eine Abweichung zwischen den physikalischen Parametern vor und wird diese intersensorische Diskrepanz vom Menschen nicht wahrgenommen, so bezeichnet er dieses psychologische Phänomen als perzeptuelle Kongruenz. Damit definiert perzeptuelle Kongruenz gleichfalls eine Begrenzung menschlicher Informationsverarbeitung (wie die absolute oder differentielle Schwelle Einschränkungen bezüglich eines oder mehrerer Parameter innerhalb einer Modalität kennzeichnen). Physikalische und perzeptuelle Kongruenz resultieren jedoch, wie einige Untersuchungen zeigten, in einem Qualitätsunterschied des integrierten Perzepts (z.B. Gepshtein et al., 2005; Soto-Faraco, Lyons, Gazzaniga, Spence & Kingstone, 2002;). Diese qualitative Veränderung erfolgte kontinuierlich (vgl. Soto-Faraco et al., 2002) und deutet darauf hin, dass bei der Integration von perzeptuell kongruenten Stimulusparametern auch Entscheidungsprozesse eine Rolle spielen können (vgl. Marks, 2004).

Folgende bereits allgemein gestellte Fragen sind demzufolge heute offen und für das Anforderungsprofil eines HSI für wirklichkeitsnahes Arbeiten mit nachgiebigen Objekten oder Kontakten bedeutsam:

- 1) Führt bimodale gegenüber unimodaler Darbietung zu einem überlegenen menschlichen Auflösungsvermögen des physikalischen Parameters Nachgiebigkeit?
- 2) Dominiert eine Modalität die bimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit?
- 3) Wo liegt die Grenze zwischen perzeptueller Kongruenz und detektierbarem intermodalem Konflikt bei bimodaler Nachgiebigkeitswahrnehmung?

Die Fragestellungen wurden durch experimentelle Studien adressiert und in den folgenden Abschnitten (7-1-3 bis 7-1-5) zusammengefasst. Das für alle Experimente verwendete Experimentalsystem sowie die für die experimentellen Untersuchungen grundlegende Methode wird in Abschnitt 7-1-2 vorgestellt, eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 7-1-6.

²⁶ Unter Redundanz werden Objekt- oder Umgebungseigenschaften verstanden, die sowohl multisensorisch dargestellt bzw. wahrgenommen werden können: Beispielsweise kann die Größe eines Objektes sowohl visuell als auch haptisch wahrgenommen werden und ist damit redundant.

7-1-2 Experimentalumgebung

7-1-2-1 Human System Interface

Es wurde ein Experimentalsystem aufgebaut, das Nachgiebigkeit haptisch sowie visuell darstellen kann (s. Abbildung 7-3): Das HSI besteht aus zwei Teilkomponenten, dem haptischen Ein-/Ausgabegerät, das das Testen eines virtuell generierten nachgiebigen Objektes durch Greifen erlaubte, sowie einem TFT-Monitor, über den die visuelle Darstellung der virtuell generierten, nachgiebigen Objekte erfolgte.

Haptisches Subsystem. Das haptische Ein-/Ausgabegerät wurde aus zwei SCARA Robotern mit je einem Freiheitsgrad (1DOF) konstruiert (nähere Informationen sind bei Kuschel, 2004 nachzulesen): Beide Roboterarme wurden dabei so positioniert (s. Abbildung 7-3), dass sie mit Daumen und Zeigefinger gegriffen und manipuliert werden konnten. Der Fingerabstand betrug 80 mm. An die Roboterarme wurden über einen drehbaren Stift Metallplatten von 25 x 35 mm Breite mal Höhe angebracht und mit einer dünnen Silikonschicht überzogen, die Materialähnlichkeit zu den visuell dargestellten Würfeln simulierte. Die Drehbarkeit bewirkt, dass die Finger beim Greifen stets parallel zueinander stehen, während, wie in Abbildung 7-4 ersichtlich, die Roboterarme einen Winkel nach innen bilden. Das haptische Ein-/Ausgabegerät erlaubt zudem lediglich das Greifen, nicht jedoch eine Verschiebung des virtuellen Würfels in x- oder y-Richtung.

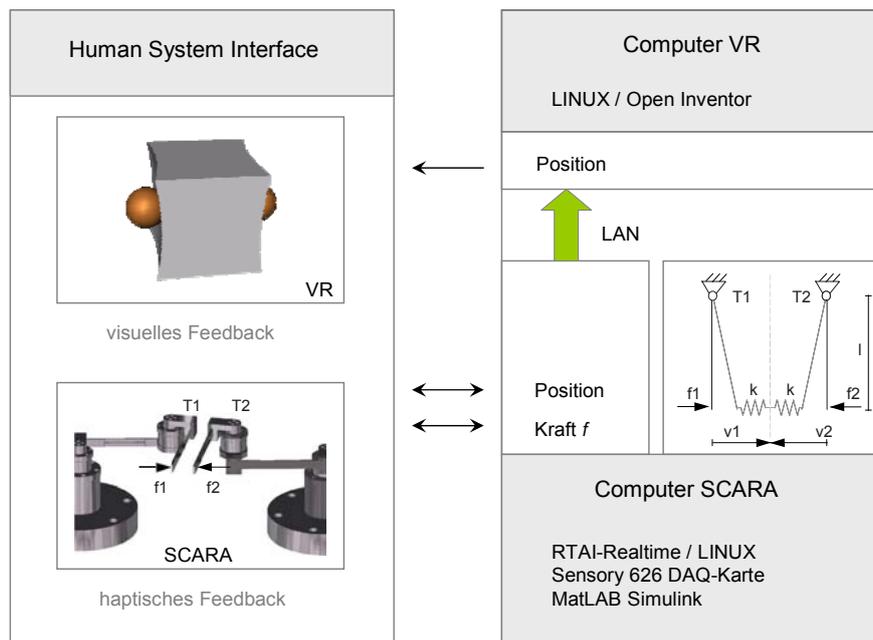


Abb. 7-3 Mensch-Maschine-Schnittstelle und Realzeit-Verarbeitungseinheit: Positions- und Kraftdaten werden gemessen und an die SCARAs rückgemeldet. Positionsdaten werden für die VR verrechnet und visuell ausgegeben.

Die durch den Operator beim Greifen aufgebrachten Kräfte (Maximalkraft beschränkt auf 35 N) wurden über Kraftmomenten-Sensoren an den Roboterarmen gemessen. Die aktuelle Fingerposition wurde über die Veränderung des Roboterarms relativ zur Normalposition im Punkt T berechnet (s. Abbildung 7-3). Kraft- wie auch Positionsdaten wurden mit 1 kHz abgetastet; die Signalverarbeitung erfolgte in Echtzeit unter Matlab/Simulink. Die Regelung beider

Roboterarme erfolgte unabhängig, als Regelungskonzept wurde Admittanzregelung implementiert.

Visuelles Subsystem. Visuelle Informationen wurden über einen TFT-Monitor ausgegeben: Die grauen Würfel mit einer Kantenlänge von 80 mm wurden über Open Inventor computer-generiert und vor einem schwarzen Hintergrund dargestellt. Zusätzlich wurden zwei orange-farbene Kugeln realisiert, die die Fingerspitzen symbolisierten und eine aktive Interaktion mit den Würfeln erlaubten (s. Abbildung 7-4). Die visuelle Darstellung erfolgte demzufolge nicht in 3D, sondern in pseudo-3D.

Um beim Probanden das Gefühl zu verstärken, er würde den Würfel direkt greifen, wurde der Monitor über dem haptischen Ein-/Ausgabegerät positioniert und um 40° geneigt, so dass die Sichtachse des Probanden auf die Hände am haptischen Ein-/Ausgabegerät gerichtet ist (s. Abbildung 7-4). Zusätzlich wurde die visuelle Darstellung des Würfels in immer gleicher Weise präsentiert: Der Würfel wurde nicht in x-Richtung verschoben, sondern lediglich in y-Richtung um 15 mm gekippt (s. Abbildung 7-4).

Die am haptischen Ein-/Ausgabegerät gemessenen Positionssignale wurden vom SCARA-Computer weiter an den VR-Computer übertragen, der die veränderte Fingerposition in eine veränderte Eindringtiefe der Fingerspitzen in die visuelle Würfelsimulation über ein Admittanzmodell umsetzte.

7-1-2-2 Über das HSI realisierte Stimuli

Für die einzelnen Experimente wurden unterschiedliche Nachgiebigkeiten haptisch, visuell (Eindringtiefe der Finger beim Greifen) sowie bimodal, haptisch-visuell, dargeboten. Dabei wurde darauf geachtet, dass ein möglichst breiter Wertebereich über das HSI realisierbarer haptischer Nachgiebigkeiten abgedeckt wurde. Als diese Standardnachgiebigkeiten wurden 7 Werte definiert: 0.222, 0.421, 0.500, 0.851, 1.379, 2.450 und 4.878 mm/N. Sie wurden bestimmt durch Aufzeichnen der Kraft, die nötig ist, um die Greifer des Ein-/Ausgabegerätes um 20 mm zusammenzudrücken.

Bei rein haptischer Testung wurde der TFT-Monitor ausgeschaltet.

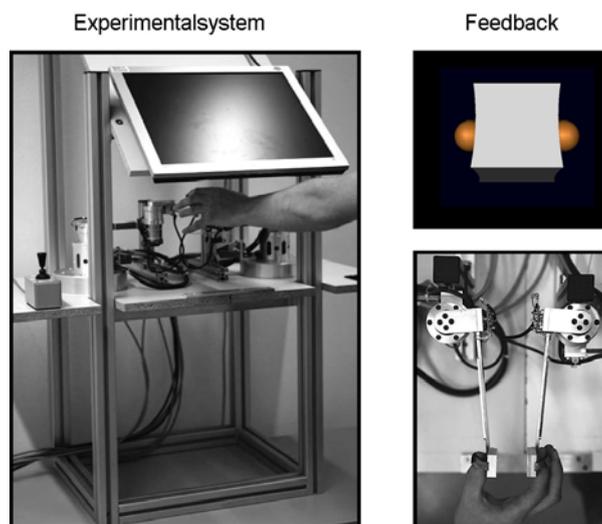


Abb. 7-4 Experimentalsystem für die Wahrnehmung von Nachgiebigkeit. Virtuell generierte Würfel konnten zwischen Daumen und Zeigefinger in einer computergenerierten Umgebung über die SCARAs aktiv eingedrückt werden.

Bei rein visueller Testung wurden die End-Eindrucktiefen definiert und visuell dargeboten; dabei war ein aktives visuelles Eindrücken der virtuellen Würfel über das haptische Ein-/Ausgabegerät möglich. Es wurde jedoch keinerlei haptische Rückmeldung gegeben. Da außerdem die Greifer bis zum Anschlag geschlossen werden konnten, wurden auch zusätzliche Informationen der Fingerposition ausgeschlossen.

7-1-2-3 Versuchsaufbau und -durchführung

Wie oben beschrieben (s. Abbildung 7-4), konnten die Probanden so vor dem HSI Platz nehmen, dass sie fast senkrecht auf den TFT-Monitor blickten. Im rechten Winkel griffen sie mit Daumen und Zeigefinger der rechten Hand die beiden SCARAs. Mit der linken Hand konnten sie den Joystick kommandieren, dessen Positionen mit den möglichen Antwortalternativen belegt und zusätzlich für den Probanden beschriftet wurden.

Eine auditive Maskierung während der Versuche war nicht nötig, da das HSI keinerlei Geräusche verursachte, die den Probanden über die experimentellen Variationen hätten auditiv informieren können. Über Tonsignale wurden Start und Ende eines Reizpräsentationsdurchgangs (Trial) angekündigt.

Vor Testbeginn wurden die Probanden standardisiert instruiert und hatten die Möglichkeit, sich während eines kurzen Trainings mit dem Umgang mit dem HSI vertraut zu machen. Bei Testende wurden demographische Faktoren und zusätzliche, relevante Personenvariablen über Fragebögen erhoben.

7-1-3 Experimentalblock VIII – Unimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit

Wie bereits in Abschnitt 7-1-1 erläutert wurde, kann bei bimodaler Wahrnehmung eines nachgiebigen Objektes die visuelle Modalität lediglich Informationen über die Veränderung der Position, resp. der Eindrucktiefe der Finger in die Würfeloberfläche beitragen. Es existieren jedoch keinerlei Forschungsergebnisse zur visuellen Diskriminierung von Eindrucktiefe bzw. dem Fingerabstand, wenn zugleich ein Objekt dargeboten wird, das auch eine Interpretation (in diesem Fall im Sinne eines nachgiebigen Würfels) zulässt. Einige Untersuchungen zum visuellen Auflösungsvermögen von Position existieren bereits, konzentrieren sich jedoch auf die Diskriminierung von Länge oder Größe eines Objektes oder auch dem Fingerabstand (s. Abschnitt 7-1-1). Die Diskriminierungsleistung durch das visuelle System ist dabei sehr hoch und beträgt beispielsweise 10% (Gepshtein & Banks, 2003), wenn der Abstand paralleler, vertikaler Linien diskriminiert werden soll.

Inwiefern visuell die Eindrucktiefe der Finger in einen Würfel, dessen „Nachgiebigkeit“ demzufolge allein über die maximale Eindrucktiefe definiert ist, diskriminiert werden kann, ist von Interesse. Bei bimodaler Wahrnehmung wird aktiv gegriffen und das Objekt eingedrückt; die meisten Untersuchungen zum Auflösungsvermögen visueller Positionsinformation bieten darüber hinaus unveränderbare Informationen statisch dar, die nur in Distanz-, Positions- oder Längeninformatoren variieren (s. Abschnitt 7-1-1). Inwiefern also ein aktives Eindrücken ohne relevante Rückmeldung der aktuellen Fingerposition, die visuelle Diskriminierungsleistung beeinflussen kann soll im Folgenden untersucht werden.

Dass auch in einem anderen Sinn ein vergleichbares Perzept gewonnen werden kann, wurde u.a. bereits bei der Wahrnehmung von Rauigkeit in der auditiven Modalität gezeigt (vgl. Lederman, Martin, Tong & Klatzky, 2003; Lederman, 1979).

In Anlehnung an die Ergebnisse zur haptischen Wahrnehmung von Tan et al. (1995), die bei zusätzlicher Variation von Positionsinformation einen Anstieg der Weber-Brüche für Kraftdiskriminierung nachwiesen, wird erwartet, dass das aktive Eindringen eines Würfels im Sinne einer zusätzlichen (irrelevanten) Variation eine Unschärfe der Wahrnehmung visueller Eindrucktiefe bedingt. Im Vergleich dazu wird erwartet, dass sich Menschen bei visueller Diskriminierung ohne aktives Eindringen v.a. auf Positionsinformationen verlassen und demzufolge die Weber-Brüche geringer und mit den aus der Literatur berichteten vergleichbar ist (z.B. Gepshtein & Banks, 2003).

Hypothese VIII-1: Visuelle Diskriminierungsleistung ist höher, wenn nicht aktiv, sondern statisch passiv exploriert wird.

Bei der haptischen Wahrnehmung von Nachgiebigkeit müssen Positions- und Kraftsignale kombiniert werden, was in einem Anstieg der Weber-Brüche gegenüber der Diskriminierung entweder von Positions- oder Kraftinformationen zu resultieren scheint (vgl. Tan et al., 1995). Das visuelle System hingegen kann lediglich Positionsinformationen verarbeiten. Aufgrund der unterschiedlichen Menge zu verarbeitender Informationen bei der Diskriminierung eines haptisch nachgiebigen bzw. visuell unterschiedlich tief eindrückbaren Würfels wird ein Unterschied im Auflösungsvermögen beider Modalitäten erwartet.

Hypothese VIII-2: Die visuelle Diskriminierungsleistung unterscheidet sich von der haptischen.

7-1-3-1 Methode

Versuchsdesign. Um die Fragestellungen testen zu können, wurde eine Umsetzung unterschiedlicher Modalitäten notwendig: Die Schwellen sollten haptisch (H) und visuell (V) erhoben werden. Zusätzlich war bei visueller Darbietung die Explorationsmethode relevant: Die visuelle Eindrucktiefe sollte durch aktives Eindringen des visuell dargestellte Würfels (V_a) oder durch statisch passives Eindringen, d.h. lediglich durch Beobachten der maximalen Eindrucktiefe (V_p), exploriert werden. Beide Faktoren wurden als Innersubjektfaktoren umgesetzt

Zusätzlich wurden, um Reaktionstendenzen zu verhindern, die Reizintensitäten bei der ersten Präsentation des Vergleichsreizes variabel gewählt. Die Startdiskrepanzen (d.h. die Abweichungen vom Standardreiz) lagen bei 80%, 75%, 70%, 65% und 60%. Zusätzlich wurden Dummy-Würfel definiert, die bei haptischer Darbietung eine Standardnachgiebigkeit von 0.5 mm/N und bei visueller Darbietung als maximale Eindrucktiefe 13 mm aufwiesen. Die Startlevel definierten stets eine Abweichung von Werten kleiner als der Standardreiz; für den haptischen Fall betragen die Diskrepanzen 80%, 75%, 70%, 65% und 60%, bei der visuellen Darstellung bei 80% (V_p , V_a), 75% (V_a), 70% (V_a , V_p).

Die Schwellenerhebung erfolgte nach Modalität getrennt und wurde in drei Blöcken erhoben (visuell, haptisch; die Ergebnisse aus dem dritten Block werden in Abschnitt 7-1-5-5 dargestellt). Die einzelnen startreizabhängigen Reizdarbietungen innerhalb eines jeden Blocks sowie die Reihenfolge der Blöcke wurden randomisiert.

Versuchsdurchführung. Der virtuelle Würfel wurde mit einer der in Abschnitt 7-1-2-2 beschriebenen Standardnachgiebigkeiten, d.h. mit 0.851 mm/N, umgesetzt.

Das HSI wurde um einen zusätzlichen Drehknopf erweitert, der eine Veränderung der virtuell dargestellten Nachgiebigkeit durch den Probanden erlaubte (im Sinne der Herstellungsmethode). Dieses Endlospotenziometer wurde so programmiert, dass eine Vollumdrehung (360°) einer Änderung um 50% entsprach. Während eines Versuchsdurchgangs konnte der Proband den Drehknopf gegen und im Uhrzeigersinn bewegen; nur die Bewegung im Uhrzeigersinn reduzierte die Diskrepanz zwischen Standard- und Vergleichsreiz. Die Anpassung des Vergleichsreizes war beschränkt und begann mit einer festgelegten Startdiskrepanz oberhalb oder unterhalb der Schwelle und war begrenzt auf einen Endwert jeweils bei 50% unterhalb bzw. oberhalb der Schwelle. Das Herstellen der wahrgenommenen Nachgiebigkeit des Standardreizes konnte in beide Richtungen erfolgen: Die Probanden wurden jedoch instruiert, möglichst genau zu arbeiten und das Einstellen mit so wenig Drehungen wie möglich zu erreichen.

Mittels des Joysticks konnte der Proband zwischen der Darbietung von Standard- und Vergleichsreiz wechseln. Über Lichtsignale wurde zusätzlich angezeigt, welcher der beiden Reize gerade dargestellt wurde (s. Abbildung 7-5). Der Wechsel zwischen Standard- und Vergleichsreiz erfolgte mit einer Verzögerung von 1s (Interstimulus-Intervall) und führte zu einem Rückführen der Greifer in die Startposition, um zum einen bei der haptischen Schwellenerhebung reines Positionsmatching (vgl. Klatzky & Lederman, 2003b) sowie bei visueller Darbietung visuelles Matching zu unterbinden. Ein erneuter Wechsel zur jeweils anderen Reizart konnte zusätzlich erst nach 2s vorgenommen werden.

Hatte der Proband den subjektiv zum Standardreiz passenden Vergleichsreiz eingestellt, konnte er durch Betätigen des Joysticks den eingestellten Wert speichern und somit das Trial beenden. Das nächste Trial wurde mit einem Ton signalisiert; das Intertrial-Intervall betrug 2 s.

Wie oben erwähnt, erfolgte die Schwellenerhebung innerhalb von zwei Experimentalblöcken: Dies bedeutet, dass innerhalb des visuellen Testblocks sowohl aktiv (V_a) als auch statisch passiv (V_p) die visuelle Eindringtiefe eingestellt werden konnte. Um dem Probanden zu signalisieren, welche der beiden visuellen Bedingungen jeweils innerhalb eines Trials dargeboten wurde, wurde zusätzlich die mittlere Position der LED mit der entsprechenden Information belegt und beschriftet (s. Abbildung 7-5). Bei haptischer Schwellenerhebung wurde der Monitor ausgeschaltet.

Um kontrollieren zu können, ob die bereits in Abschnitt 5-2 angesprochene Personenvariable die Performanz beeinflusst, wurde den Teilnehmern bei Testende die Subskala Immersive Tendenz aus dem Präsenzfragebogen von Scheucherpflug (2001) vorgelegt (s. Anhang D). Zusätzlich füllten die Probanden einen demographischen Fragebogen aus.

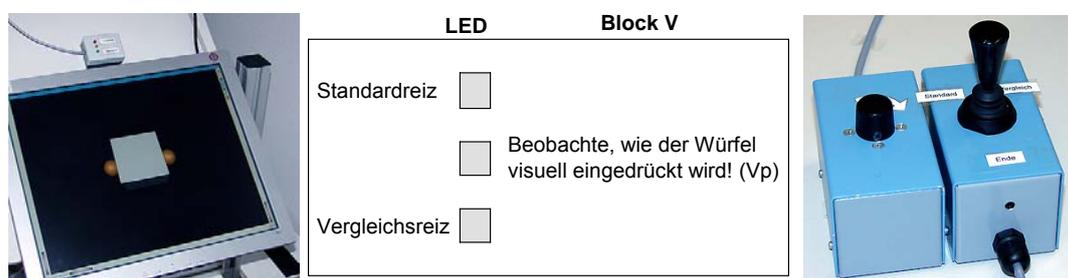


Abb. 7-5 Links: Der TFT-Monitor mit der visuellen Darstellung des Würfels, darüber ist die LED angebracht. Mitte: Bedeutung der einzelnen Positionen der LED sowie besonders der mittleren Position für den Block V. Rechts: Joystick zum Wechseln zwischen Standard und Vergleich sowie Beenden des Trials und Drehregler zum Einstellen der Nachgiebigkeit (Eindringtiefe).

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Die unimodalen Matchings wurden mittels Herstellungsmethode erhoben (s. Abschnitt 3-1-2-1). Jedes Trial begann mit der Präsentation des Standardreizes; zum Vergleichsreiz (mit variablem Startwert ober- oder un-

terhalb des Standardreizes) konnte durch Betätigen des Joysticks gewechselt werden. Aufgabe des Probanden war, den Vergleichsreiz über den Drehknopf so einzustellen, dass sie keinen Unterschied zum Standardreiz mehr wahrnehmen können.

Alle 10 individuellen Settings des Vergleichsreizes wurden aufgezeichnet; der Mittelwert der so erhaltenen Häufigkeitsverteilung wurde berechnet und ist (s. Abschnitt 3-1-2-1) als PSE definiert. Das Maß seiner Streuung (Standardabweichung) wurde nach Formel (4) ermittelt und definiert die Unterschiedsschwelle.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die Fragebogenwerte analysiert und ihr Einfluss auf die Diskriminierungsleistung untersucht. Die Unterschiedsschwelle (DL) wurde an der Standardnachgiebigkeit relativiert und deskriptiv dargestellt.

Die Hypothesen wurden in zwei Schritten geprüft: Die Hypothese VIII-1, d.h. der Einfluss der Explorationsart (aktiv, passiv), wurde mit einem t-Test für abhängige Stichproben bei visuellem Matching einseitig gegen ein Signifikanzniveau von 2.5% getestet.

Die Hypothese VIII-2 wurde (s. nähere Erläuterung in Abschnitt 7-1-5-5) über eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren eingestellte Modalität (visuell, haptisch) sowie Anzahl der dargestellten Modalitäten (uni-, bimodal) geprüft: Relevant ist der Haupteffekt des Faktors eingestellte Modalität und das Fehlen einer Interaktion (der zweite Haupteffekt wird in Abschnitt 7-1-5-5 näher behandelt). Signifikanz wurde auf dem 5% Niveau getestet; Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden mit der Korrektur von Greenhouse-Geisser korrigiert, wenn nötig.

7-1-3-2 Ergebnisse

Stichprobe. Am Experimentalblock VIII „Multimodale Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit – Direktes Einschätzen“ nahmen 23 Studenten der Technischen Universität München und der Ludwigs-Maximilians-Universität München teil. 3 Probanden mussten aus der weiteren Erhebung ausgeschlossen werden, da zu viele Schwellwerte nicht erhoben worden waren (bzw. bei einer Enddiskrepanz von 50% lagen, s. oben). Das mittlere Alter der verbleibenden 20 Studenten (15 Frauen, 5 Männer) betrug 24 Jahre. Alle Probanden waren Rechtshänder und normalsichtig oder trugen ihre Sehkorrektur.

Personenvariablen. Die Probanden beurteilten ihre immersive Tendenz; im Mittel lag ihre angegebene emotionale Involvierung bei einem Punktwert von 27.7 (Standardabweichung $sd = 6.5$), und der Grad ihrer Involvierung bei einem Punktwert 17.7 ($sd = 5.5$). Die Werte wichen nicht statistisch signifikant von der Eichstichprobe ab (vgl. Scheuchenpflug, 2001). Die beiden Faktoren korrelierten nicht signifikant mit dem DL.

Zusätzlich gaben die Probanden an, bei welcher Modalität ihnen die bimodale Schwellenerhebung leichter gefallen war. 2 Probanden bevorzugten eine Veränderung der haptischen, 13 der visuellen Modalität, während 5 keinerlei Präferenzen äußerten. Auch die Bevorzugung einer Modalität korrelierte nicht mit den Daten.

Unimodale Unterschiedsschwellen. In Abbildung 7-6 sind die Weber-Brüche in Abhängigkeit der einzelnen Bedingungen dargestellt: Wird die StandardEindrucktiefe visuell hergestellt, so scheint die Explorationsart das visuelle Auflösungsvermögen nicht zu beeinträchtigen. Unterschiede von ca. 11.5% (V_a) bzw. 12.9% (V_p) können diskriminiert werden.

In einem ersten Schritt wurde mit einem t-Test geprüft, ob die Explorationsart signifikant die Diskriminierungsleistung beeinflusst: Der Haupteffekt wurde nicht statistisch signifikant ($t(19)=0.73$, $p=0.475$).

Als zweites wurde mit einer zweifaktoriellen ANOVA der Einfluss der einzustellenden sowie der Anzahl der dargebotenen Modalitäten auf die Weber-Brüche getestet. Der Haupteffekt „eingestellte Modalität“ wurde statistisch signifikant ($F(1,19)=44.89$, $p<0.05$; $\eta^2=0.703$): Visuelles Einstellen der StandardEindrucktiefe führte zu einer geringeren Diskriminierungsleistung als haptisches Einstellen der Standardnachgiebigkeit (s. Abbildung 7-6). Um den Einfluss der einzustellenden Modalität getrennt für die Anzahl dargestellter Modalitäten zu erheben, wurde eine ANOVA bei unimodaler Darstellung berechnet: Bei unimodaler Darbietung war das haptische Auflösungsvermögen signifikant geringer als das visuelle ($F(1,19)=24.64$, $p<0.05$; $\eta^2=0.565$). Die Interaktion war nicht statistisch reliabel ($F(1,19)=1.18$, $p=0.291$).

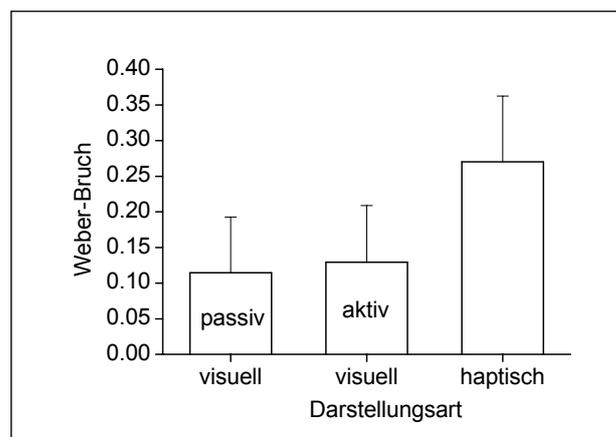


Abb. 7-6 Weber-Bruch bei visuellem und haptischem Herstellen eines unimodalen Standardreizes. Visuelles Matching erfolgte entweder passiv oder durch aktives Eindringen des nachgiebigen Würfels.

7-1-3-3 Diskussion

Ein Einfluss aktiver (visueller) Exploration im Vergleich zu passiv statischer Darbietung war diskutiert worden: Bei aktiven Eindrücken (ohne haptisches Feedback) war stärkere Unschärfe beim Auflösen visueller Eindrucktiefe erwartet worden aufgrund der zusätzlichen Möglichkeit, die Eindrucktiefe aktiv verändern zu können (Hypothese VIII-1); der Weber-Bruch bei reiner Observation der maximalen Eindrucktiefe sollte dem Wert bei reiner Positionsdiskriminierung entsprechen.

Es zeigte sich jedoch kein Einfluss der Explorationsart auf die Weber-Brüche: Ca. 13% Abweichung der visuellen Eindrucktiefe konnten detektiert werden (unabhängig von der Explorationsart). Dies wiederum entspricht den Befunden zur Positionsdiskriminierung (vgl. Gepshtein & Banks, 2003).

Da bei haptischer Wahrnehmung Positions- und Kraftinformationen kombiniert werden müssen, bei visueller Wahrnehmung eines nachgiebigen Objektes lediglich Positionsinformationen zur Verfügung stehen, wurde erwartet, dass die Diskriminierungsleistung modalitätsabhängig differiert (Hypothese VIII-2). Die Hypothese konnte bestätigt werden: Größere Unterschiede zwischen Vergleichs- und Standardreiz waren zur Diskriminierung nötig, wenn der Vergleichsreiz haptisch eingestellt werden sollte. Der Weber-Bruch lag in diesem Fall bei 0.27 und entspricht damit den aus der Literatur bereits bekannten Werten (vgl. Tan et al., 1995; Yamakawa et al., 2005). Diese höhere Diskriminierungsleistung bei visuellem Einstellen ist unabhängig von der Anzahl dargebotener Modalitäten (s. auch Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock VIII „Multimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit – Direktes Einschätzen“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
VIII-1 Visuelle Diskriminierungsleistung ist höher, wenn nicht aktiv, sondern statisch passiv exploriert wird	n. bestätigt	
VIII-2 Die visuelle Diskriminierungsleistung unterscheidet sich von der haptischen	bestätigt	$\eta^2=0.57$

7-1-4 Experimentalblock IX – Intermodale Integration

In Abschnitt 7-1-1 wurde eine Reihe offener Fragen aufgeworfen: Inwiefern bimodale Darstellung zu einer reliableren Gesamtwahrnehmung führt (Frage 1) und eine Modalität die Gesamtwahrnehmung dominiert (Frage 2), wurde in ersten Experimentalblock IX adressiert. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zusätzlich untersucht, wann die Integration von Nachgiebigkeit bei bimodaler Wahrnehmung varianzminimierend erfolgt; die Ergebnisse werden knapp, da sie nicht Hauptfragestellung dieser Arbeit waren, in Abschnitt 7-1-4-7 berichtet (ausführlichere Erläuterungen können Kuschel, in preparation, entnommen werden).

Bei der Integration von Informationen aus unterschiedlichen Sinnen werden die einzelnen, redundanten Informationen z.B. nach ihrer Reliabilität gewichtet (vgl. Ernst & Banks, 2002): Das bimodale Perzept sollte demzufolge höher reliabel sein (d.h. eine geringere Varianz aufweisen) als die beiden unimodalen.

Hypothese IX-1: Bimodale visuell-haptische Exploration führt (im Gegensatz zu unimodaler) zu einer Leistungsverbesserung. Diese äußert sich in geringerer Reaktionszeit sowie höherer Diskriminierungsleistung des Gesamtperzepts.

Darüber hinaus wird häufig ein Dominanzeffekt der einen Modalität über die andere gezeigt (s. Abschnitt 6-3); als Gründe dafür werden angeführt, dass bei der Wahrnehmung besonders von geometrischen Objekteigenschaften die visuelle Modalität geeigneter (z.B. Welch & Warren, 1986), effektiver (z.B. Calvert, Brammer & Iversen, 1998) oder reliabler (z.B. Ernst & Banks, 2002) ist. Da wie in Abschnitt 7-1-1 diskutiert wurde, sich die Wahrnehmung von Nachgiebigkeit innerhalb der visuellen und der haptischen Modalität dadurch unterscheidet, dass bei der haptischen Wahrnehmung Informationen über Eindrucktiefe (Position) mit aufgewendeter Kraft kombiniert werden müssen (vgl. Tan et al., 1995), während über die visuelle Modalität in erster Linie Informationen über die Eindrucktiefe wahrgenommen werden können, wird ein zusätzlicher Unterschied in der Diskriminierungsleistung beider Modalitäten erwartet (wie auch schon in Abschnitt 7-1-3 gezeigt wurde).

Hypothese IX-2: Visuelle und haptische Modalität unterscheiden sich bezüglich der Diskriminierungsleistung.

Eine Abhängigkeit der Diskriminierungsleistung vom Standardreiz ist besonders mit Annäherung an die absoluten Schwellen bekannt. In Abschnitt 4-2 konnte ein Einfluss der Standardnachgiebigkeit auf die Detektierbarkeit (d') nicht nachgewiesen werden, jedoch zeigte sich eine Reduzierung der Unterscheidbarkeit für harte deformierbare Objekte. Darüber hinaus sollte sich ein ähnlicher Effekt nicht nur bei haptischer Wahrnehmung, sondern auch bei visueller sowie bimodaler Diskriminierung zeigen.

Hypothese IX-3: Standardnachgiebigkeit beeinflusst die Diskriminierungsleistung.

Eine Abhängigkeit der Modalitätsdominanz von der Reizauswahl war in Abschnitt 6-3 angesprochen worden: Bei der Texturwahrnehmung ist der Einfluss der visuellen Modalität auf die Gesamtwahrnehmung nur höher, wenn diese visuell gut diskriminierbar ist (z.B. Poling, Weisenberger & Kerwin, 2003; Heller, 1985). Auch bei der Wahrnehmung von Härte wird eine Abhängigkeit der Diskriminierungsleistung von der Modalität sowie der Standardnachgiebigkeit erwartet.

Hypothese IX-4: Die Diskriminierungsleistung variiert in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit sowie der Modalität.

Die Hypothesen IX-1 bis IX-4 wurden im Rahmen einer Untersuchung zur statistisch optimalen Integration von Nachgiebigkeit an Teildatensätzen überprüft und die Ergebnisse im Abschnitt 7-1-4-5 beantwortet. Auf statistisch optimale Integration wird in Abschnitt 7-1-4-6 geprüft. Da zum Testen der MLE-Theorie die psychometrische Funktion benötigt wird und eine exakte psychophysische Erhebungsmethode die Konstanzmethode darstellt (s. Abschnitt 3-1-2-1), wurden Vorexperimente zur Stimulusauswahl nötig, um diese Methode adäquat umsetzen zu können. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 7-1-4-1 zur unimodal haptischen Wahrnehmung und in Abschnitt 7-1-4-2 zur unimodal visuellen Wahrnehmung (bei aktivem Explorieren) dargestellt.

7-1-4-1 Vorstudie 1: Haptische Diskriminierung von Nachgiebigkeit am HSI

Zur Bestimmung der haptischen Diskriminierungsleistung über das in Abschnitt 7-1-2-1 vorgestellte HSI wurde eine Voruntersuchung nötig. Zwar existieren, wie bereits in Abschnitt 4-2-1 und 7-1-1 zusammengefasst, experimentelle Ergebnisse zu den Weber-Brüchen, jedoch sollte zum einen sicher gestellt werden, dass die Darstellung der Nachgiebigkeit über das HSI nicht von den Befunden aus der Literatur abweicht und zum anderen geklärt werden, inwiefern ein breiter realisierter Wertebereich zu eventuellen Variationen in der Diskriminierungsleistung führt.

Im Folgenden wird kurz auf Abweichungen von der in Abschnitt 7-1-2-3 beschriebenen Methode eingegangen und im Anschluss knapp die Ergebnisse der Voruntersuchung vorgestellt und diskutiert.

Methode.

Versuchsdesign. Für alle 7 Standardnachgiebigkeiten (s. Abschnitt 7-1-2-2) wurden die Weber-Brüche für jeden Probanden ermittelt; Standardnachgiebigkeit war demzufolge ein Innersubjektfaktor. Die Reihenfolge der Schwellerhebungen wurde randomisiert.

Versuchsdurchführung. Für diese Versuchsdurchführung wurde lediglich das haptische Ein-/Ausgabegerät ohne TFT-Monitor verwendet und auf einem Tisch platziert; um visuelle Cues auszuschließen trugen die Probanden eine Augenbinde.

Die Reizpaare wurden sequentiell für jeweils 2 Sekunden mit einem Interstimulus-Intervall von 2 Sekunden dargeboten. Mit Beendigung eines Reizdurchgangs wurden die Roboterarme in ihre Ausgangsposition zurückgefahren. Das Intertrial-Intervall betrug 4 Sekunden. Reizpräsentationsbeginn und -ende wurde über unterschiedliche Tondauer signalisiert.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Die Unterschiedsschwelle wurde über das Staircase-Verfahren erhoben (vgl. Abschnitt 3-1-3). In Anlehnung an die Literatur, nach der die Unterschiedsschwelle bei ca. 20-30% liegt (s. Abschnitt 4-2), wurde mit einem Reiz von 80% oberhalb der Schwelle begonnen. Die Schrittgröße bis zum dritten Umkehrpunkt betrug 10% und wurde danach auf 3% verringert. Nach dem vierten Umkehrpunkt endete die Schwellwertbestimmung; die Schwelle wurde als Mittelwert der dargebotenen Reize errechnet (vgl. Klein, 2001) und am jeweiligen Standardreiz relativiert. Für jede Standardnachgiebigkeit wurde die Unterschiedsschwelle erfasst: Vergleichs- und Standardwert wurden sequentiell dargeboten, wobei die Position der beiden Reize innerhalb des Pairs randomisiert wurde. Am Ende jedes Trials gaben die Probanden durch Kommandierung des Joystick' an, ob sich der zweite Reiz weicher, härter oder gleich dem ersten angefühlt hatte.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die Wahrnehmungsschwellen (Weber-Brüche) deskriptiv dargestellt. In einem zweiten Schritt wurde mittels einer einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung auf dem Faktor Standardnachgiebigkeit überprüft, ob die Weber-Brüche abhängig von der Standardnachgiebigkeit sind. F-Statistiken werden, wenn nötig, bei Verletzungen der Sphärizität nach der Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

Ergebnisse.

Stichprobe. An der ersten Voruntersuchung (IXa) nahmen 21 Studenten der Universität der Bundeswehr München und der Technischen Universität München teil. Alle Personen waren Rechtshänder. 2 Personen mussten aus den weiteren Analysen ausgeschlossen werden, da zu viele Schwellwerte nicht bestimmbar waren. Unter den verbleibenden 19 Probanden waren 12 Männer und 7 Frauen; keiner von ihnen hatte vorhergehende Erfahrung mit psychophysischen Experimenten. Ihr mittleres Alter betrug 24 Jahre.

Haptische Nachgiebigkeitswahrnehmung am HSI (Weber-Brüche). In Tabelle 7-2 können die Mittelwerte und Standardabweichungen der Weber-Brüche entnommen werden. Im Mittel können ca. 30% Unterschiede linearer Nachgiebigkeit haptisch voneinander unterschieden werden. Mit zunehmender Nachgiebigkeit steigen die JND-% auf ca. 45% an.

Tabelle 7-2 Weber-Brüche für die Wahrnehmung von linearer Nachgiebigkeit über ein HSI.

Stimuli	MW	sd
0.222 mm/N	0.31	0.18
0.421 mm/N	0.24	0.23
0.500 mm/N	0.26	0.23
0.851 mm/N	0.27	0.20
1.379 mm/N	0.32	0.22
2.450 mm/N	0.34	0.24
4.878 mm/N	0.46	0.38

In Abbildung 7-7 sind die Werte graphisch dargestellt. Die Weber-Brüche scheinen für Nachgiebigkeiten zwischen 0.22 und 1.38 mm/N konstant bei ca. 30% zu liegen, während die Diskriminierbarkeit von Nachgiebigkeiten von mehr als 1.5 mm/N schwerer zu werden scheint.

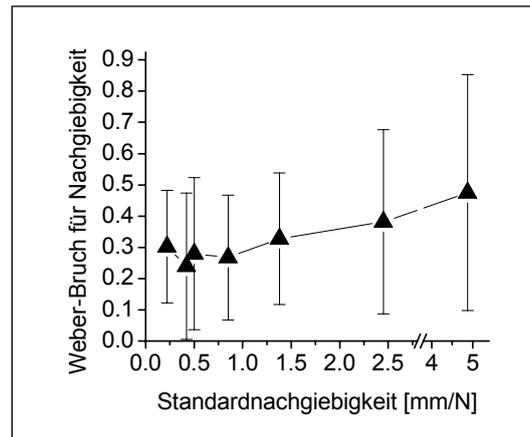


Abb. 7-7 Weber-Brüche für die haptische Wahrnehmung von Nachgiebigkeit vermittelt über das haptische Ein-/Ausgabegerät.

Die einfaktorielle ANOVA zeigt einen signifikanten, wenngleich effektschwachen Einfluss der Standardnachgiebigkeit ($F(6,108)=4.25$, $p<0.05$; $\eta^2=0.191$). Der Einfluss der Standardnachgiebigkeit verschwindet, wenn lediglich die Weber-Brüche für die Diskriminierung von Nachgiebigkeiten ohne 4.88 mm/N herangezogen werden ($F(5,90)=1.53$, $p=0.13$). In diesem Bereich kann der Weber-Bruch mit 0.29 als konstant angesehen werden.

Diskussion.

Über das in Abschnitt 7-1-2 dargestellte HSI können lineare Nachgiebigkeiten voneinander unterschieden werden, wenn sie um ca. 29% voneinander abweichen (vgl. Yamakawa et al., 2005; Wall & Brewster, 2003; O'Malley & Goldfarb, 2002; Dhruv & Tendick, 2000; Tan et al., 1995). Für Werte unterhalb von 2.5 mm/N sind die Weber-Brüche unabhängig vom Standardreiz. Oberhalb werden Unterschiede von ca. 46% der Nachgiebigkeit nötig, um weiche Objekte diskriminieren zu können.

Diese Ergebnisse stimmen auch mit den Ergebnissen aus Abschnitt 4-2 für die Wahrnehmung von nicht-linear nachgiebigen, real deformierbaren Würfeln überein²⁷.

7-1-4-2 Vorstudie 2: Diskriminierung visueller Eindringtiefe am HSI

Wie bereits in Abschnitt 7-1 erläutert wurde, können bei bimodaler Wahrnehmung eines nachgiebigen Objektes neben der haptischen Wahrnehmung lediglich visuelle Positionsinformationen über die Eindringtiefe beitragen. Um die visuelle Diskriminierungsleistung unterschiedlicher Eindringtiefen in einen visuell dargestellten virtuellen Würfel erheben zu können, wurde eine weitere Voruntersuchung nötig, um einen breiteren Wertebereich abzudecken als in Abschnitt 7-1-3. Wie dort bereits gezeigt werden konnte, spielt aktives oder statisch passives Explorieren visueller Eindringtiefe keine Rolle. Aus diesem Grund wird die aktive Explorationsmethode präferiert, da sie den Probanden erlaubt, in ihrem Tempo den visuell dargestellten Würfel zu greifen.

Zusätzlich soll geprüft werden, inwiefern sich die Diskriminierungsleistung in Abhängigkeit der Standardreize verändert. Die zweite Voruntersuchung zur visuellen Wahrnehmung von Eindringtiefe wird im Folgenden kurz zusammengefasst; auf die Abweichungen von der in

²⁷ Die in Abschnitt 4-2 berichtete Abnahme der Diskriminierbarkeit (JND-%) bei sehr geringer Nachgiebigkeit konnte für eine Diskriminierung über das HSI aufgrund des über das HSI darstellbaren Wertebereichs nicht repliziert werden.

Abschnitt 7-1-2-3 zusammen gefassten Methode wird zuerst eingegangen und im Anschluss daran knapp die Ergebnisse der Voruntersuchung vorgestellt und diskutiert.

Methode.

Versuchsdesign. Als Stimuli wurden die in Abschnitt 7-1-2-2 beschriebenen virtuellen Würfel visuell mit unterschiedlicher maximaler Eindrucktiefe umgesetzt. Es wurden vergleichbar zu den haptischen Nachgiebigkeiten 7 StandardEindrucktiefen definiert, die das darstellbare Spektrum optimal ausnutzten: Sie betragen 1, 5, 10, 15, 20, 25 und 30 mm. Die Darbietung der Reize erfolgte wie in Abschnitt 7-1-2-3 beschrieben.

Für alle 7 StandardEindrucktiefen wurden die Weber-Brüche für jeden Probanden als Inner-subjektfaktor ermittelt. Die Reihenfolge der Schwellerhebungen wurde für jeden Probanden randomisiert.

Versuchsdurchführung. Reizpaardarbietungsdauer, experimenteller Ablauf und Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwellen wurden, exakt wie in Abschnitt 7-1-4-1 vorgestellt, repliziert.

Statistische Analyse. Die Wahrnehmungsschwellen wurden zuerst deskriptiv dargestellt und im Anschluss daran die Ergebnisse einer einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung auf dem Faktor StandardEindrucktiefe berichtet. F-Statistiken werden, wenn nötig, bei Verletzungen der Sphärizität mittels der Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt.

Ergebnisse.

Stichprobe. Am Experimentalblock IXb „Multimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit – Voruntersuchung 2 zur intermodalen Integration“ nahmen 20 Studenten der Universität der Bundeswehr München und der Technischen Universität München (13 Männer, 7 Frauen) teil. Alle Personen waren Rechtshänder. Fünf Personen hatten bereits an psychophysischen Experimenten, nicht jedoch zur Wahrnehmung von Nachgiebigkeit teilgenommen. Das mittlere Alter der Stichprobe betrug 25 Jahre. Alle Personen wiesen normale oder auf Normalität korrigierte Sehtüchtigkeit.

Visuelle Diskriminierung der Eindrucktiefe (Weber-Brüche). Der Tabelle 7-3 können die Mittelwerte und Standardabweichungen der Weber-Brüche entnommen werden. Die visuelle Diskriminierungsleistung scheint relativ konstant für Standardreize zwischen 20 und 30 mm: Die Unterschiedsschwelle liegt bei ca. 23%. Objekte, deren maximale Eindrucktiefe bei 10-15 mm liegt, können bezüglich ihrer Eindrucktiefe erst bei mehr als 30% Abweichung voneinander visuell diskriminiert werden. Zu den Grenzen der Wahrnehmung (d.h. mit zunehmender Härte des Objektes, d.h. mit zunehmend geringer Eindrucktiefe) wachsen die Weber-Brüche sehr rasch an.

In Abbildung 7-8 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Während die Diskriminierungsleistung für Eindrucktiefen über 10 mm relativ konstant bleibt, nehmen sie für Eindrucktiefen von 1 und 5 mm rasch ab. Um zu überprüfen, ob sich die Diskriminierungsleistung in Abhängigkeit der StandardEindrucktiefe verändert, wurde eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung berechnet: StandardEindrucktiefe beeinflusste die Weber-Brüche signifikant (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.4, 27.2)=27.02$, $p<0.05$; $\eta^2=0.67$); Bonferroni-post-hoc Tests zeigen, dass sich der Weber-Bruch für eine StandardEindrucktiefe von 1 mm signifikant von allen anderen Werten unterscheidet (p -Werte < 0.05).

Tabelle 7-3 Weber-Brüche für die visuelle Wahrnehmung der Eindringtiefe der Finger in einen über das HSI dargestellten Würfel.

Stimuli	MW	sd
1 mm	1.17	0.80
5 mm	0.40	0.21
10 mm	0.31	0.23
15 mm	0.29	0.22
20 mm	0.23	0.22
25 mm	0.25	0.25
30 mm	0.22	0.18

Da der Einfluss der StandardEindringtiefe ausschließlich auf den Einfluss des Weber-Bruchs bei 1 mm zurückzugehen scheint, wurde der Wert für eine weitere ANOVA ausgeschlossen. Erneut zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Standardreizes auf die Diskriminierungsleistung ($F(5,95)=5.10$, $p<0.05$) mit jedoch geringerer Effektstärke ($\eta^2=0.212$). Der Einfluss kann über einen linearen Trend erklärt werden ($F(1,19)=16.63$, $p<0.05$; $\eta^2=0.467$): Mit zunehmender Eindringtiefe erhöht sich die Diskriminierungsleistung.

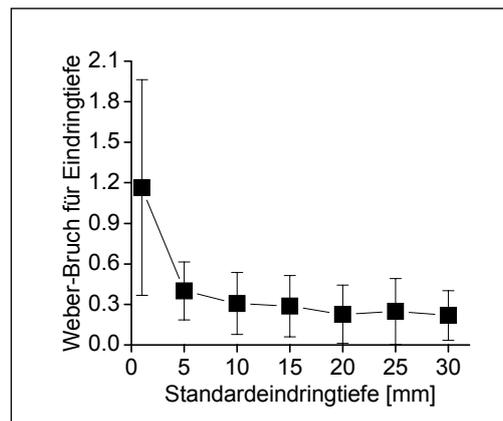


Abb. 7-8 Weber-Brüche für die visuelle Wahrnehmung der Eindringtiefe der Finger in einen virtuell generierten „nachgiebigen“ Würfel.

Diskussion.

Unterschiede in der visuell umgesetzten Eindringtiefe der Fingerkuppen in den dargestellten Würfel können wahrgenommen werden, wenn sie mindestens um 25% voneinander abweichen. Dabei nimmt die Diskriminierungsleistung zu, d.h. die Weber-Brüche nehmen ab, wenn die maximale Eindringtiefe, zunimmt. Die in der Voruntersuchung ermittelten Weber-Brüche liegen deutlich höher als bei der Diskriminierung von Länge oder Größe ermittelt (z.B. Norman et al., 1996; Kelvin, 1954; Gepshtein & Banks, 2003) sowie wie in Abschnitt 7-1-3 erhoben.

Vermutlich resultiert der Anstieg der Weber-Brüche der visuellen Modalität aufgrund der Schwellenerhebungsmethode: Das direkte Herstellen scheint den Probanden leichter zu fallen, als ein paarweiser Vergleich. Möglicherweise ist dies auf die Unmittelbarkeit der Entscheidung und Überprüfung bei direktem Herstellen zurückzuführen. Werden die paarweisen Vergleiche randomisiert, d.h. nicht wie bei der Staircase-Methode in auf- und absteigenden Sequenzen, dargeboten, könnte erneut ein Anstieg der Diskriminierungsleistung beobachtbar sein. Dies ist in diesem Fall auf eine weitere Erschwerung der der Diskriminierung von

Unterschieden in der visuellen Modalität zurückzuführen und wird in Abschnitt 7-1-6 zusammenfassend überprüft.

7-1-4-3 Methode für das Testen visuell-haptischer Integration

Wie oben bereits angedeutet, ist für die Überprüfung der Hypothesen zur intermodalen Integration ein umfangreiches experimentelles Testprogramm zur Bestimmung der psychometrischen Funktionen erforderlich, das nun im Folgenden zusammengefasst wird. In den vorangegangenen Abschnitten wurden die zur Stimulusauswahl nötigen Informationen gewonnen; die exakte Umsetzung der Erhebungsmethode (Konstanzmethode) wird in diesem Abschnitt dargestellt. In den darauf folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse erläutert und diskutiert.

Stimuli. Als Stimuli wurden virtuell generierte Würfel ausgewählt, die, wie schon in den vorangegangenen Abschnitten, entweder in ihrer haptischen (keine visuelle Rückmeldung, s. Abschnitt 7-1-4-1), in ihrer visuellen „Nachgiebigkeit“ (keine haptische Rückmeldung, s. Abschnitt 7-1-4-2) oder in visuell und haptisch dargestellter Nachgiebigkeit variieren. Auf dieser Grundlage wurden vier Reizklassen realisiert, die sich in der Art der Rückmeldung voneinander unterscheiden: Dabei entsprachen die unimodal visuelle Darstellung (V) und die unimodal haptische Darstellung (H) der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Umsetzung über das HSI (s. Abschnitt 7-1-2-2); zusätzlich wurden zwei bimodale Reizklassen definiert, von denen eine die zurückzumeldende Nachgiebigkeit kongruent in beiden Modalitäten darzustellen vorsah (VH), während die andere einen Konflikt zwischen der visuellen und haptischen Darstellung einführte (VHI)²⁸.

Ausgehend von drei Stärken der Nachgiebigkeiten, die in Anlehnung an Abschnitt 7-1-3 so ausgewählt wurden, dass sie möglichst den gesamten Bereich geringer, mittlerer sowie hoher Nachgiebigkeit repräsentierten, wurden als Standardnachgiebigkeiten 0.222, 0.851 sowie 1.379 mm/N ausgewählt. Adäquat dazu wurden die visuellen Eindrücktiefen ausgemessen (s. Anhang F2). Diese drei Standardnachgiebigkeiten stellten die Basis für die weitere Reizauswahl dar: Sie wurden in den Reizklassen V, H und VH umgesetzt. Für die zusätzliche Reizklasse VHI war eine Abweichung jeweils einer Modalität von der anderen (in der Standardnachgiebigkeit umgesetzten) Modalität²⁹ notwendig; diese Abweichung sollte, damit der Konflikt nicht wahrgenommen wird, unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen. Es wurden also zusätzlich Nachgiebigkeiten definiert, die von der Nachgiebigkeit der Referenzmodalität abweichen (dazu wurden die Ergebnisse aus dem anschließenden Abschnitt 7-1-6 zugrunde gelegt): Diese Nachgiebigkeiten, im Folgenden als Referenznachgiebigkeiten bezeichnet, definieren sich wie in Tabelle 7-3 dargestellt. Die Reizklasse VHI enthielt somit sechs definierte Standardreize (s. dazu Anhang F).

Die Referenznachgiebigkeiten wurden zusätzlich, um das Testen der MLE-Theorie zu gewährleisten, sowohl in den jeweiligen unimodalen Reizklassen (bei haptischer Referenznachgiebigkeit demzufolge in der Reizklasse H, bei visueller Referenznachgiebigkeit in der Reizklasse V) als auch in der Reizklasse VH als Standardreiz dargeboten (s. Tabelle 7-4 und ausführlich in Anhang F).

Die Vergleichsreize wurden in Abhängigkeit der Unterschiedsschwellen (s. Abschnitt 7-1-4-1 und -2 für die unimodalen Fälle ermittelt) so gewählt, dass sie sich vom Standardreiz um die Unterschiedsschwelle, eine Standardabweichung unterhalb sowie eine und zwei Standard-

²⁸ Der Vollständigkeit halber wird in diesem Abschnitt auch die Reizklasse VHI definiert beschrieben; sie ist relevant für die Testung der MLE-Theorie und demzufolge erst in Abschnitt 7-1-4-6 relevant.

²⁹ Die in der Standardnachgiebigkeit dargestellte Modalität wird im Folgenden als Referenzmodalität oder als Referenz bezeichnet.

abweichungen oberhalb abwichen; zusätzlich wurden mindestens zwei weitere Werte ausgewählt (s. ausführlich Anhang F).

Tabelle 7-4 Standardnachgiebigkeiten wurden unimodal sowie bimodal kongruent dargeboten. Die bimodal diskrepante Darstellung der Nachgiebigkeit setzte sich zusammen aus der in der Referenzmodalität definierten Standard- und der in der anderen Modalität inkongruent definierten Nachgiebigkeit (Reizklasse VHI).

	Standard-nachgiebigkeit	Referenznachgiebigkeit	
		Referenzmodalität Haptik – Visuell inkongruent	Referenzmodalität Sicht – Haptisch inkongruent
	0.222 mm/N	0.222 mm/N + 90%	0.222 mm/N + 75%
	0.851 mm/N	0.851 mm/N + 84%	0.851 mm/N + 53%
	1.379 mm/N	1.379 mm/N + 55%	1.379 mm/N + 52%
Reizklassen	V, H, VH	V, VH	H, VH

Versuchsdesign. Die psychometrische Funktion (Kennwerte: Mittelwert bzw. PSE sowie dessen Varianz) wurden in Abhängigkeit der Modalität (visuell, haptisch, bimodal kongruent, bimodal inkongruent) sowie der Standard- und Referenznachgiebigkeiten erfasst (und zwar im Besonderen für Werte oberhalb der definierten Nachgiebigkeiten). Da die aufgrund der Konstanzmethode bedingte Testzeit zur Ermittlung einer Schwelle relativ hoch ist, wurde Modalität als Zwischengruppenfaktor und Standardreiz als Innersubjektfaktor festgelegt. Demzufolge wurde für jede der oben beschriebenen Reizklassen eine Modalitätsgruppe definiert: In den beiden Gruppen V und H sowie der Gruppe VHI (inkongruente bimodale Darstellung) wurden jeweils sechs, für die Gruppe VH (bimodal kongruente Darstellung) neun, psychometrische Funktionen erhoben wurden. Um die Testzeit in Gruppe VH vertretbar gering zu halten, wurde die Testung auf zwei Tage ausgedehnt.

Zu Testende wurde der Immersionsfragebogen (s. Anhang D) ausgegeben; der demographische Fragebogen wurde um weitere Fragen zur Qualität der Schnittstelle (s. Abbildung 7-9B) sowie eine zusätzliche gruppenspezifische Frage für die Gruppen VH und VHI erweitert (s. Abbildung 7-9A). Die Reihenfolge der Abfrage der einzelnen Modalitäten (zuerst Haptik oder zuerst Sicht) für die gruppenspezifische Frage wurde über die Teilnehmer innerhalb der beiden Gruppen (VH, VHI) randomisiert.

Versuchsdurchführung. Das in Abschnitt 7-1-2 dargestellte HSI wurde als Testumgebung eingesetzt. Die unimodal haptische (Reizklasse H) sowie die unimodal visuelle Darstellung (Reizklasse V) erfolgte wie in Abschnitt 7-1-2-3 beschrieben. Bei bimodal kongruenter Darstellung stimmte die Stärke der haptischen Nachgiebigkeit mit der visuellen Eindrucktiefe bei Standard- und Vergleichsreizen immer überein, während bei bimodal inkongruenter Darstellung der bimodale Standardreiz wie oben beschrieben intermodal differierte, während die Vergleichsreize wiederum bimodal kongruent über das HSI dargeboten wurden.

Die Teilnehmer explorierten nacheinander zwei nachgiebige Objekte für je 2 Sekunden; das Interstimulus-Intervall betrug 2 Sekunden und das Intertrial-Intervall 4 Sekunden. Reizpräsentationsbeginn sowie -ende wurde jeweils mit einem Tonsignal angekündigt. Das Trial endete mit der Antwort des Probanden: Nach Ende der zweiten Reizpräsentation waren die Probanden aufgefordert so schnell und akkurat wie möglich ihre Antwort über den Joystick einzugeben und zu beurteilen, ob sich der zweite Reiz härter oder weicher als der erste Reiz angefühlt hatte.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle. Die Unterschiedsschwelle wurde über das klassische Verfahren der Konstanzmethode (s. Abschnitt 3-1-2-1) erhoben. Diese Methode bietet eine relativ genaue Schätzung der psychometrischen Funktion.

Bei der Konstanzmethode werden neben der Definition eines festen Standards (wie in allen anderen psychophysischen Methoden) zuvor festgelegte Vergleichsreize sequentiell (mehrfach) exploriert und miteinander verglichen. Wie oben bereits beschrieben wurden lediglich Vergleichsreize oberhalb des Standards ausgewählt, d.h. es wurde lediglich die obere Schwelle (wie auch in den Abschnitten 7-1-3-1 und 4-2) adressiert. Jede Kombination wurde achtmal wiederholt randomisiert dargeboten, um eine genaue Schätzung der psychometrischen Funktion zu erlauben. Nach jedem Reizpaar entschied der Proband, ob sich der zweite Reiz größer (weicher) oder kleiner (härter) als der erste anfühlte. Position von Standard- und Vergleichsreiz wurden randomisiert. Aus den gewonnenen relativen Häufigkeiten wurde mit Hilfe der »psignifit« Software (Version 2.5.6) über Matlab/Simulink (The Mathworks Inc., USA) eine psychometrische Funktion (mit s-förmigen Verlauf) mathematisch ermittelt (s. Wichmann & Hill, 2001a, b; Hill, 2002). Kennwerte dieser psychometrischen Funktion sind der PSE (50%-Schwelle, s. Abschnitt 3-1-2-1) sowie die Standardabweichung (SD) des PSE, die dem DL entspricht.

Fragebogen zu Versuchsende						
A) Gruppenspezifische Frage bei bimodaler Reizdarbietung (Gruppe VH, VHI)						
Auf was t der Schnittstelle						
Fragen nach Scheuchpflug (2001) mit 7-stufiger Antwortskala:						
a. „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit ihrer Umgebung?“						
b. „Wie stark trug das, was sie gesehen haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hinversetzt fühlten?“ <i>(nicht Gruppe H)</i>						
c. „Wie stark trug das, was sie geföhlt haben, dazu bei, dass Sie sich in die virtuelle Umgebung hinversetzt fühlten?“ <i>(nicht Gruppe V)</i>						
d. „Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?“						
1	2	<i>gy:3</i>	4 <i>Ge</i>	5	<i>ner6</i>	<i>7al,</i>
sehr gering			sehr hoch			
Fragebogen zu Versuchsende						
A) Gruppenspezifische Frage bei bimodaler Reizdarbietung (Gruppe VH, VHI)						
Auf was haben Sie während der Experimente besonders geachtet: auf das Geföhlte oder auf das Gesehene oder auf beides?						
Bitte entscheiden Sie sich für eine Möglichkeit:						
<input type="checkbox"/>	auf das Geföhlte					
<input type="checkbox"/>	auf das Gesehene					

Abb. 7-9 Der Fragebogen, den die Probanden zu Versuchsende ausfüllen sollten, wurde gruppenspezifisch zusammengesetzt. Bei bimodaler Reizdarbietung (Gruppe VH, VHI) wurden die zusätzliche gruppenspezifische Frage A gestellt. Die Qualität der Schnittstelle (B) wurde bei Gruppen VH, VHI über 4 Fragen, bei den beiden unimodalen jeweils nur über 3 Fragen erhoben. Den Immersionsfragebogen (C) füllen alle Probanden aus.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die Fragebogenwerte analysiert. Mit einer einfaktoriellen MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) wurde getestet, ob sich die vier Stichproben hinsichtlich ihrer Personenvariablen voneinander unterscheiden. Mit dem Kruskal-Wallis-Test wurde anschließend geprüft, ob sich die Gruppen in ihrer Bewertung der Fragen zur Bewertung der Qualität der Schnittstelle (s. Abbildung 7-9B) voneinander unterscheiden (s. Abschnitt 7-1-4-4).

Als nächstes wurden die Kennwerte der psychometrischen Funktion (PSE, Standardabweichung SD) wie oben beschrieben ermittelt (s. dazu auch Abbildung 7-10). Für das Prüfen der Hypothesen IX-1 bis IX-4 wurde ein Teildatensatz (SD der Gruppe V, H, VH) verwendet. Wie bereits in Abschnitt 3-1-1 erläutert, entspricht die Standardabweichung der psychometrischen Funktion (SD) der Unterschiedsschwelle (DL). Diese relevante abhängige Variable wurde jeweils am entsprechenden Standardreiz relativiert. Die Ergebnisse wurden zuerst deskriptiv dargestellt (s. Abschnitt 7-1-4-5). Um den Einfluss der Modalität (Gruppe V, H, VH) sowie der dargebotenen (Standard-) Nachgiebigkeit (0.222, 0.851 und 1.379 mm/N) auf die Weber-Brüche zu prüfen, wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung auf einem Faktor berechnet. Zusätzlich wurde für die verbleibenden (Referenz-) Nachgiebigkeiten (s. Tabelle 7-4) sowie die beiden möglichen Modalitätsgruppen (V vs. VH bzw. H vs. VH) ein signifikanter Einfluss auf die Weber-Brüche mit zwei zweifaktoriellen ANOVAs geprüft (s. Abschnitt 7-1-4-5). Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt; F-Statistiken wurden bei Verletzungen der angenommenen Sphärizität mit der Korrektur nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

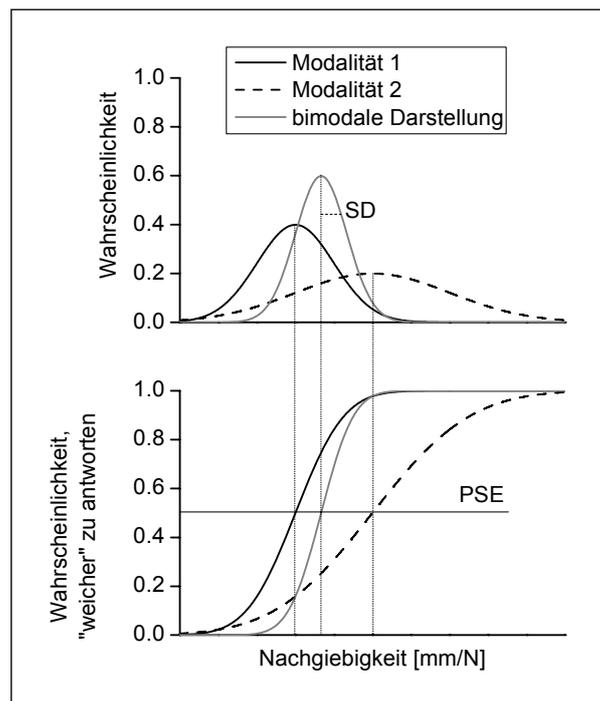


Abb. 7-10 Bei wiederholter Darbietung von Reizpaaren ermittelte Wahrscheinlichkeit, den 2. Reiz als größer (oder weicher) zu bewerten, ergeben sich gauß-förmige Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen in Abhängigkeit der jeweiligen Darbietung (unimodal oder bimodal) mit einem bestimmten Mittelwert und einer Standardabweichung (SD). Der Mittelwert ist der Wert der Verteilungsfunktion, bei dem in 50% der Fälle mit „2. Reiz ist größer“ oder „2. Reiz ist weicher“ geantwortet wird (s. Abschnitt 3-1-2); dieser Wert entspricht dem PSE.

Inwiefern visuelle und haptische Reize bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit statistisch optimal integriert werden, wird in Abschnitt 7-1-4-6 geprüft (für eine ausführlichere Diskussion und weiterführende Informationen, s. Kuschel, in preparation). Die MLE-Theorie nimmt an, dass die bimodalen Mittelwerte der psychometrischen Funktion (PSE, s. auch Abbildung

7-10) sich durch lineare Kombination der gewichteten unimodalen PSE als statistisch optimal vorhersagen lassen wie folgt

$$PSE_{opt} = k_H \cdot PSE_H + k_V \cdot PSE_V \quad (8)$$

mit der zugehörigen optimalen Varianz

$$SD_{opt}^2 = \frac{SD_V^2 \cdot SD_H^2}{SD_V^2 + SD_H^2} \quad (9).$$

Über die Varianzen der psychometrischen Funktionen für die einzelnen Modalitäten können die Gewichte k_V und k_H berechnet werden, wie im Folgenden exemplarisch angegeben:

$$k_V = \frac{SD_H^2}{SD_H^2 + SD_V^2} \quad (10).$$

Die Ergebnisse werden für den relativen Beitrag der einzelnen Modalitäten an den jeweiligen Gesamtmittelwerten (PSE) deskriptiv getrennt für kongruente (VH) und inkongruente (VHI) Integration dargestellt. Inwiefern sich die optimal geschätzten Mittelwerte von den experimentell ermittelten unterscheiden, wurde zusätzlich über einen t-Test für unabhängige Stichproben getestet. Das Signifikanzniveau wurde, um eine Alpha-Fehler-Kumulierung zu verhindern, auf 1% erhöht.

7-1-4-4 Stichprobe und Personenvariablen

Stichprobe. Am Experimentalblock IX „Multimodale Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit – Intermodale Integration“ nahmen 58 Studenten der Technischen Universität München und der Ludwigs-Maximilians-Universität München teil und wurden zufällig einer der vier Experimentalgruppen (V, H, VH, VHI) zugeteilt. Die Ergebnisse von 14 Teilnehmern mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, da keine psychometrische Funktion angepasst werden konnte; 9 dieser Personen nahmen an der Schwellenerhebung in Gruppe V teil. 11 Studenten (6 Männer, 5 Frauen) mit einem durchschnittlichen Alter von 24 Jahren untersuchten die Reize rein haptisch (Gruppe H); 10 Personen (4 Männer, 6 Frauen), durchschnittlich 26 Jahre alt, testeten die Reize ohne haptische Rückmeldung durch visuelles Eindringen des Würfels (Gruppe V). Den verbleibenden Teilnehmern wurden die Würfel bimodal dargestellt: 12 Personen (6 Männer, 6 Frauen) mit einem durchschnittlichen Alter von 24 Jahren untersuchten kongruente Stimuli (Gruppe VH), während 11 Probanden (4 Männer, 7 Frauen), durchschnittlich 25 Jahre alt, inkongruente Reize explorierten (Gruppe VHI). Alle Studenten waren Rechtshänder und normalsichtig oder trugen ihre Sehkorrektur.

Personenvariablen. Um einen Einfluss der immersiven Tendenz auf die Schwellwerte erheben zu können, wurden die beiden Faktoren emotionale Involvierung und Grad der Involvierung für alle vier Versuchsgruppen ermittelt (s. Tabelle 7-5). Die Werte der einzelnen Gruppen wichen nicht signifikant von denen der Eichstichprobe ab (vgl. Scheuchenpflug, 2001). Keiner der beiden Faktoren korrelierte signifikant mit den Weber-Brüchen. Es konnte kein signifikanter Effekt für die Faktoren „Grad der Involvierung“ ($F(3,40)=1.39$, $p=0.259$) oder „emotionale Involvierung“ ($F(3,40)=0.79$, $p=0.505$) über die einfaktorielle MANOVA nachgewiesen werden.

Wie in Abbildung 7-9A dargestellt, beantworteten die Probanden in den beiden bimodalen Gruppen VH und VHI eine zusätzliche Frage: Die meisten Probanden gaben an, mehr auf das Gefühle geachtet zu haben (Gruppe VH: $n=9$; Gruppe VHI: $n=7$); bedeutend weniger

gaben an, mehr auf das Gesehene (Gruppe VH: n=2, Gruppe VHI: n=1) oder zugleich auf beide Modalitäten geachtet zu haben (Gruppe VH: n=1; Gruppe VHI: n=3). Die Angaben korrelierten nicht signifikant mit den Weber-Brüchen.

Tabelle 7-5 Ergebnisse der einzelnen Gruppen im A) Immersionsfragebogen sowie B) für die vier Fragen aus der Subskala Qualität der Schnittstelle (s. Abb.7-7).

	Gruppe H		Gruppe V		Gruppe VH		Gruppe VHI		
	MW	sd	MW	sd	MW	sd	MW	sd	
A) Immersionsfragebogen – Faktoren:									
Emotionale Involvierung	29.9	5.2	27.4	3.9	26.8	5.0	27.1	6.7	
Grad der Involvierung	21.0	3.8	21.2	5.7	19.0	4.5	17.6	5.2	
B) Fragen zur Qualität der Schnittstelle:									
a. Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion?	4.5	1.0	4.0	0.9	3.9	1.7	4.7	1.0	
b. Wie stark trug das Gesehene dazu bei, dass Sie sich hineinversetzt fühlten?			4.1	1.2	4.5	1.6	4.6	1.6	
c. Wie stark trug das Gefühle dazu bei, dass Sie sich hineinversetzt fühlten?	5.3	1.1			5.3	1.2	5.4	1.4	
d. Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Umgebung mit der realen Erfahrung überein?	4.4	1.1	4.1	1.4	4.3	1.6	4.9	1.1	

In Tabelle 7-5 sind zusätzlich die mittleren Ratings für die vier Fragen zur Qualität der Schnittstelle zusammengestellt. Im Schnitt geben die Probanden unabhängig von der Versuchsgruppe an, dass die allgemeine Qualität eher gut war. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte keine signifikanten Unterschiede für die in Abbildung 7-9B zusammengestellten Fragen (Frage a: $\chi^2(3)=3.13$, $p=0.373$; Frage b: $\chi^2(2)=0.62$, $p=0.733$; Frage c: $\chi^2(2)=0.219$, $p=0.896$; Frage d: $\chi^2(3)=1.69$, $p=0.639$).

7-1-4-5 Einfluss von Standardreiz und Modalität auf die Weber-Brüche

Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche. In Tabelle 7-6 sind die Weber-Brüche zusammengetragen. Im Mittel können 30% Unterschiede bei haptischer und bimodaler Darstellung der Nachgiebigkeit voneinander diskriminiert werden, während mehr als 50% Unterschiede nötig sind, um zwischen visuellen Eindrücktiefen unterscheiden zu können. Besonders harte Würfel (bzw. Würfel mit geringer Eindrücktiefe) führen zu einer Erhöhung der Weber-Brüche um mehr als das Doppelte im Vergleich zu den Gruppen VH und H.

Tabelle 7-6 Weber-Brüche für drei Gruppen (V, H, VH) in Abhängigkeit der Standardreize.

Nachgiebigkeit	haptisch		visuell		bimodal kongruent	
	MW	sd	MW	sd	MW	sd
0.222 mm/N	0.37	0.30	0.85	0.74	0.33	0.13
0.851 mm/N	0.25	0.11	0.55	0.28	0.25	0.14
1.379 mm/N	0.26	0.13	0.61	1.13	0.32	0.06
0.389 mm/N	0.47	0.33			0.34	0.10
1.302 mm/N	0.56	0.62			0.32	0.13
2.096 mm/N	0.35	0.19			0.39	0.16
0.422 mm/N			0.95	1.01	0.33	0.09
1.566 mm/N			0.36	0.33	0.36	0.11
2.137 mm/N			0.24	0.16	0.35	0.15

In Abbildung 7-11 sind die Weber-Brüche für die drei Standardnachgiebigkeiten in Abhängigkeit der dargebotenen Modalität (unimodal haptisch oder visuell, bimodal kongruent) dargestellt. Standardnachgiebigkeit scheint keinen Einfluss auf die Diskriminierungsleistung auszuüben. Es wird jedoch ein deutlicher Unterschied in den Weber-Brüchen in Abhängigkeit der dargebotenen Modalität erkennbar: Besonders das Diskriminieren von Unterschieden der visuellen Eindrucktiefe resultiert in einem starken Anstieg der Weber-Brüche im Vergleich zur Diskriminierung der haptischen oder bimodalen virtuellen Nachgiebigkeit.

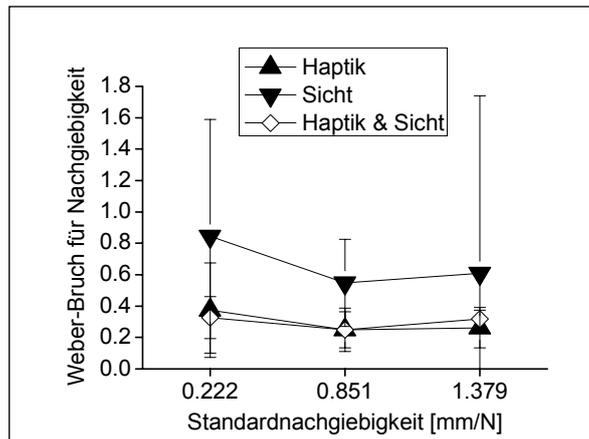


Abb.7-11 Diskriminierungsleistung innerhalb der einzelnen Modalitäten (Darbietung unimodal haptisch oder visuell, bimodal) in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit.

Einfluss der Standardnachgiebigkeit und der Modalität auf die Weber-Brüche. Der Einfluss der Standardnachgiebigkeit (0.222, 0.851 sowie 1.379 mm/N) sowie der Modalität (H, V, VH) auf die Diskriminierungsleistung wurde über eine zweifaktorielle ANOVA geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-7 dargestellt.

Tabelle 7-7 F-Statistiken der 3x3 ANOVA für die beiden Faktoren Modalität (visuell, haptisch, bimodal kongruent) und die Nachgiebigkeiten (0.222, 0.851 und 1.379 mm/N).

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Standardnachgiebigkeit (3)	5.36 (1.1,34.3)*	< 0.05	0.152
WW Standardnachgiebigkeit x Modalität	2.68 (2.3,34.3)*	0.076	0.151
HE Modalität (3)	4.85 (2,30)	< 0.05	0.244

Der Standardreiz beeinflusst zwar die Weber-Brüche, jedoch ist der Effekt sehr gering und kann daher vernachlässigt werden. Die Diskriminierungsleistung unterschied sich ebenfalls signifikant in Abhängigkeit von der Art der Darstellung (visuell, haptisch, visuell-haptisch). Aufgrund der Hypothesen wurden zwei Einzelvergleiche berechnet und die Weber-Brüche der Gruppe V mit denen der Gruppe H verglichen; der Unterschied wurde statistisch signifikant ($F(1,19)=4.95$, $p<0.05$; $\eta^2=0.207$) und zeigt eine Überlegenheit der haptischen gegenüber der visuellen Modalität, ist jedoch als eher effektschwach zu bezeichnen. Um die erwartete Überlegenheit der bimodalen Diskriminierung zu prüfen, wird gegen die beste der beiden Einzelmodalitäten (in diesem Fall die haptische) getestet: Ein signifikanter Unterschied konnte jedoch nicht nachgewiesen werden ($F(1,21)=0.00$, $p=0.969$).

Einfluss der Referenznachgiebigkeit und der Modalität auf die Weber-Brüche. In einem zweiten Schritt wurde der Einfluss der Referenznachgiebigkeit in Abhängigkeit der Modalität auf die Weber-Brüche geprüft. Wie in Abbildung 7-12A ersichtlich scheint weder die Refe-

renznachgiebigkeit noch die Modalität die Weber-Brüche zu beeinflussen; ein leichter Trend für eine höhere Diskriminierungsleistung scheint sich für die Schwellwerte bei bimodal kongruenter Darstellung abzuzeichnen. Ein Einfluss der Referenznachgiebigkeit zeichnet sich jedoch in Abbildung 7-12B für die visuelle Modalität ab: Besonders geringe visuelle Eindrücktiefen scheinen schwerer diskriminierbar zu sein, als bei einer bimodal kongruenten Darstellung.

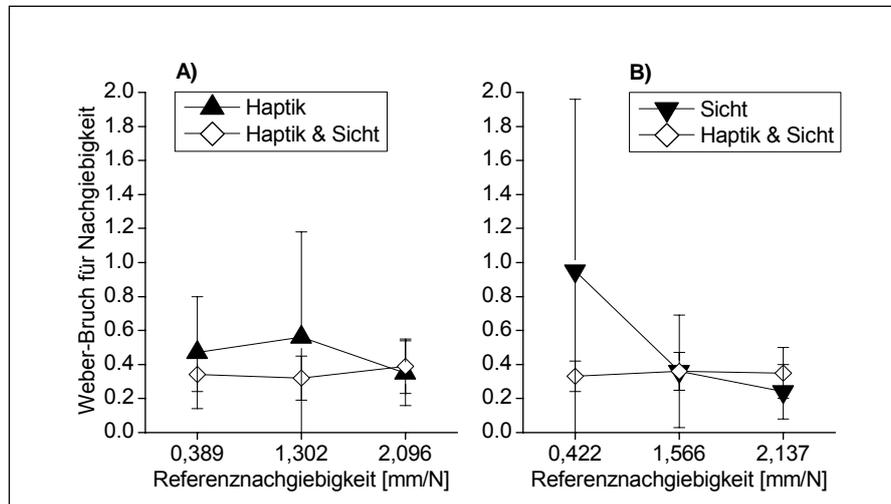


Abb. 7-12 Einfluss der Referenznachgiebigkeit sowie der Modalität auf den Weber-Bruch.

Die Ergebnisse der getrennten ANOVAs sind in Tabelle 7-8 zusammengestellt.

Wie zuvor bereits deskriptiv erläutert wurde, kann weder ein Einfluss der Referenznachgiebigkeit noch der Modalität (haptisch, bimodal kongruent) auf die Weber-Brüche nachgewiesen werden (s. Tabelle 7-8A).

Werden hingegen die Weber-Brüche für die Diskriminierbarkeit visueller Eindrücktiefe und visuell-haptischer Nachgiebigkeit verglichen, zeigt sich ein Einfluss der Referenznachgiebigkeit (s. Tabelle 7-8B); der Effekt ist jedoch gering und eher zu vernachlässigen. Auch die Interaktion mit der Modalität wird statistisch signifikant und deutet an, dass besonders bei sehr harten Würfeln (geringe Eindrücktiefe) das visuelle Auflösungsvermögen dem bei bimodal kongruenter Darstellung unterlegen ist.

Tabelle 7-8 F-Statistiken der zweifaktoriellen ANOVA für den Vergleich der A) haptischen und B) visuellen jeweils mit der bimodal kongruenten Darstellung, sowie der visuellen mit der bimodal kongruenten Darstellung.

	A) haptisch			B) visuell		
	F-Wert (df)	p	η^2	F-Wert (df)	p	η^2
HE Referenznachgiebigkeit (3)	0.58 (1.3,27.5)*	0.498	0.027	4.43 (1.1,21.1)*	< 0.05	0.181
WW Referenznachgiebigkeit x Modalität	2.27 (1.3,27.5)*	0.138	0.098	5.26 (1.1,21.1)*	< 0.05	0.208
HE Modalität (2)	1.19 (1,21)	0.288	0.054	1.00 (1,20)	0.329	0.048

7-1-4-6 Exkurs zur statistisch optimalen Integration

Kongruente Darbietung. Die nach Formel (10) ermittelten relativen Beiträge der beiden Modalitäten an der Gesamtwahrnehmung wurden in Tabelle 7-9 zusammengestellt: Unabhängig von der Standardnachgiebigkeit trägt die haptische Modalität bedeutend mehr zur Gesamtwahrnehmung bei als die visuelle Modalität.

Die in Abhängigkeit der Standardnachgiebigkeit aus der Linearkombination der einzelnen Modalitäten geschätzten optimalen Mittelwerte PSE_{opt} wurden in Tabelle 7-9 denen in Gruppe VH experimentell erhobenen PSE_{VH} gegenübergestellt: Die Werte liegen nahe beieinander. Darüber hinaus wird auch deutlich, dass mit höherer Nachgiebigkeit (1.379 mm/N) die Abweichung zwischen dem optimalen und dem experimentell ermittelten PSE tendenziell zunimmt.

Um zu testen, ob sich die beiden PSE-Werte (optimal, Gruppe VH) signifikant voneinander unterscheiden, wurde das 99%-Konfidenzintervall³⁰ für jede der Standardnachgiebigkeiten berechnet (s. Tabelle 7-9). Alle Konfidenzintervalle enthalten die Null: Die optimalen und experimentell erhobenen PSEs unterscheiden sich demzufolge nicht signifikant voneinander.

Tabelle 7-9 Relativer Beitrag k der einzelnen Modalitäten an dem über die MLE-Theorie bestimmten optimalen Gesamtperzept PSE_{opt} (mit Standardabweichung SD_{opt}). Für den Vergleich zwischen optimal berechneten und experimentell ermittelten bimodalen PSE (Gruppe VH) wurden die Grenzen des 1%-Konfidenzintervalls KI für den Mittelwertsvergleich berechnet.

Standardnachgiebigkeit	k_H	k_V	PSE_{opt}	SD_{opt}	PSE_{VH}	SD_{VH}	Grenzen KI
0.222 mm/N	0.84	0.16	0.22	0.01	0.22	0.07	[-0.06;0,07]
0.851 mm/N	0.83	0.17	0.98	0.04	0.93	0.21	[-0.14;0,24]
1.379 mm/N	0.84	0.16	1.65	0.11	1.53	0.44	[-0.28;0,52]

Inkongruente Darbietung. In Tabelle 7-10 sind die relativen Beiträge der einzelnen Modalitäten an der geschätzten optimalen Gesamtwahrnehmung zusammengestellt. Wird die visuelle Modalität zur haptischen inkongruent dargestellt, so dominiert die haptische Modalität die Gesamtwahrnehmung unabhängig von der Referenzmodalität (s. Tabelle 7-10). Der relative Beitrag sinkt jedoch und ist teilweise sogar für die visuelle Modalität stärker, wenn die visuelle Modalität die Referenzmodalität zeigt (s. Tabelle 7-10).

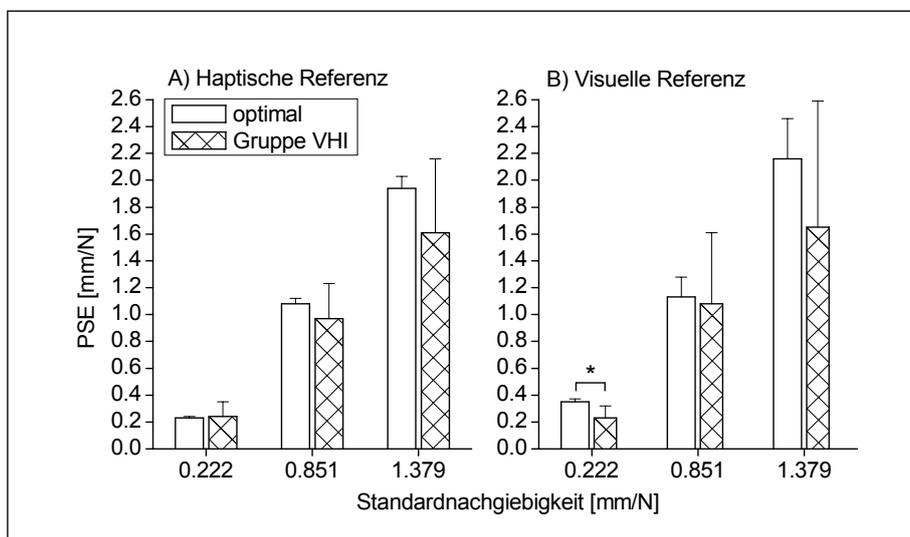


Abb. 7-13 Die aufgrund der in der MLE-Theorie vorhergesagten optimalen PSE und die in der Gruppe VH ermittelten bimodalen PSE sind in Abhängigkeit von der Standardnachgiebigkeit abgetragen.

In Abbildung 7-13 sind die, jeweiligen aufgrund der MLE-Theorie berechneten, optimalen PSE den in Gruppe VHI berechneten gegenübergestellt. Die Abweichungen zwischen den PSEs werden mit zunehmender Standardnachgiebigkeit größer, auch die Standardabwei-

³⁰ Da mehrfach getestet wird, wurde das Signifikanzniveau auf 1% heraufgesetzt, um eine α -Fehler-Kumulierung zu verhindern (s. Bortz, 2005).

chung in der experimentellen Gruppe steigt stark an. Gerade bei sehr weichen Objekten, die inkongruent dargestellt wurden, scheinen erneut die vorhergesagten PSE von den experimentell ermittelten abzuweichen.

Tabelle 7-10 Relativer Beitrag k der einzelnen Modalitäten an dem über die MLE-Theorie bestimmten optimalen Gesamtperzept PSE_{opt} (mit Standardabweichung SD_{opt}). Für den Vergleich zwischen optimal berechneten und experimentell ermittelten bimodalen PSE (Gruppe VH) wurden die Grenzen des 1%-Konfidenzintervalls KI für den Mittelwertsvergleich berechnet. (*) kennzeichnet, wenn die Null nicht im Intervall enthalten ist und somit der Unterschied signifikant wurde.

A) haptische Referenz	k_H	k_V	PSE_{opt}	SD_{opt}	PSE_{VHS}	SD_{VHS}	Grenzen KI
0.222 mm/N	0.96	0.04	0.23	0.01	0.24	0.11	[-0.11;0.09]
0.851 mm/N	0.88	0.12	1.08	0.04	0.97	0.26	[-0.13;0.36]
1.379 mm/N	0.66	0.34	1.94	0.09	1.61	0.55	[-0.19;0.85]
B) visuelle Referenz	k_H	k_V	PSE_{opt}	SD_{opt}	PSE_{VHS}	SD_{VHS}	Grenzen KI
0.222 mm/N	0.51	0.49	0.35	0.02	0.23	0.09	[0.03;0.20]*
0.851 mm/N	0.29	0.71	1.13	0.15	1.08	0.53	[-0.46;0.56]
1.379 mm/N	0.57	0.43	2.16	0.30	1.65	0.94	[-0.42;1.43]

In Tabelle 7-10 sind neben den relativen Gewichten k der einzelnen Modalitäten auch die optimalen und experimentell ermittelten PSE zusammengestellt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den PSEs kann nur für einen Fall nachgewiesen werden: Wird in der visuellen Modalität eine Nachgiebigkeit von 0.222 mm/N dargeboten (und weicht demzufolge die haptische ab), so wird der Unterschied zwischen ihnen signifikant (das Konfidenzintervall enthält die Null nicht). Dass die deskriptiven Unterschiede bei einer Nachgiebigkeit von 1.379 mm/N zwischen den vorhergesagten und experimentell bestimmten PSEs nicht statistisch signifikant werden, ist aufgrund der hohen Varianz der Gruppe VHS nicht verwunderlich.

Zusammenfassung. Es kann überwiegend davon ausgegangen werden, dass bei visueller und haptischer Exploration von Nachgiebigkeit diese statistisch optimal integriert wird. Zusätzlich zeigt sich eine stärkere Gewichtung der haptischen Modalität in der Gesamtwahrnehmung, besonders bei kongruenter bimodaler Darstellung wie auch, wenn die haptische Modalität in der Standardnachgiebigkeit und die visuelle in der abweichenden Referenznachgiebigkeit dargestellt sind.

7-1-4-7 Allgemeine Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Integration visueller und haptischer Informationen sind in Tabelle 7-11 anschaulich zusammengefasst. Ähnlich wie in den Abschnitten 7-1-4-1 und 7-1-4-2 wurde ein Einfluss der dargestellten Nachgiebigkeit auf die Diskriminierungsleistung gezeigt; erneut war jedoch der Effekt eher gering und kann vernachlässigt werden (Hypothese IX-3).

Ebenso konnte für die haptische Diskriminierung erneut bestätigt werden, dass im Mittel 30% Unterschiede zwischen den Nachgiebigkeiten diskriminiert werden können; dies stimmt mit der Voruntersuchung (s. Abschnitt 7-1-4-1), dem direkten Herstellen wahrgenommener Nachgiebigkeit (s. Abschnitt 7-1-3) sowie der Diskriminierung realer Objekte (s. Abschnitt 4-2), aber auch mit den Befunden aus der Literatur überein (z.B. Wall & Brewster, 2003; O'Malley & Goldfarb, 2002; Tan et al., 1995).

Die Ergebnisse für die Diskriminierbarkeit visueller Eindrücktiefen entsprechen für sehr hohe Eindrücktiefen den in Abschnitt 7-1-4-2 berichteten Befunden: Ca. 30% Unterschiede können diskriminiert werden. Diese Werte liegen erneut über denen, die für visuelle Positionsdiskriminierung nachgewiesen wurden (s. Gepshtein & Banks, 2003; s. auch Abschnitt 7-1-3). Mit zunehmend geringerer Eindrücktiefe fällt die Leistung dieser Stichprobe stärker ab als in Abschnitt 7-1-4-2 ermittelt. Dies könnte erneut auf die psychophysische Methode zurückzuführen sein: Für die Gruppe V musste fast ein Drittel an Versuchspersonen nacherhoben werden. Dies indiziert, wie bereits in Abschnitt 7-1-4-2 erläutert, dass bei randomisierter Darbietung paarweises Vergleichen visueller Positionsinformation bei nachgiebigen Würfeln die Unterscheidbarkeit erschwert (s. dazu Abschnitt 7-1-6).

Tabelle 7-11 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock IX „Wahrnehmung von Nachgiebigkeit – Teil 1: Integration“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
IX-1 Bimodale Darbietung führt zu einer geringeren Diskriminierungsleistung.	n. bestätigt	
IX-2 Visuelle und haptische Modalität unterscheiden sich bezüglich der Diskriminierungsleistung	teilweise bestätigt	$\eta^2=0.20$
IX-3 Nachgiebigkeit beeinflusst die Diskriminierungsleistung	teilweise bestätigt	zu vernachlässigen
IX-4 Die Diskriminierungsleistung variiert in Abhängigkeit der Referenznachgiebigkeit sowie der Modalität	n. bestätigt	

Wird die visuelle und haptische Diskriminierbarkeit virtuell dargestellter nachgiebiger Würfel betrachtet, lässt sich ein Unterschied zwischen den Modalitäten bestätigen. Im Gegensatz zu Abschnitt 7-1-3 ist jedoch nicht, wie erwartet (s. Hypothese IX-2), die visuelle Modalität der haptischen überlegen. Der hauptsächliche Grund hierfür kann auf die geringe Performanz der Gruppe V und vermutlich damit auf die psychophysische Erhebungsmethode zurückgeführt werden. Zusätzlich ist der relative Beitrag der haptischen Modalität an der Gesamtwahrnehmung stärker ausgeprägt. Dies kann zum einen durch Lenkung der Aufmerksamkeit auf die, in diesem Fall, haptische Modalität entstehen (z.B. Guest & Spence, 2003a): Die Probanden der Gruppe VH gaben an, stärker auf die haptische Modalität geachtet zu haben (s. Abschnitt 7-1-4-4). Zum anderen resultiert jedoch bei reduzierter Reliabilität der einen Modalität eine stärkere Gewichtung der anderen (z.B. Helbig & Ernst, 2004).

Die bimodal kongruente Darbietung der Nachgiebigkeit führt zu ähnlich hoher Diskriminierungsleistung wie bei rein haptischer Darbietung. Eine signifikante Reduzierung der Diskriminierungsleistung gegenüber der geringsten unimodalen (s. Hypothese IX-1) konnte jedoch nicht bestätigt werden. Visuelle und haptische Informationen werden jedoch überwiegend statistisch optimal kombiniert.

7-1-5 Experimentalblock X – Grenzen der Integration

In Abschnitt 7-1-1 wurde die Frage nach den Grenzen der Integration gestellt (Frage 3), d.h. wie stark die visuellen von den haptischen Informationen (oder umgekehrt) räumlich voneinander abweichen dürfen, ehe der visuell-haptische Konflikt bemerkt wird.

Die Lenkung der Aufmerksamkeit auf die inkongruenten Modalitäten kann dabei die Höhe der intermodalen Wahrnehmungsschwelle beeinflussen (vgl. Kapitel 3, s. auch Abschnitt 6-2-3). Da Informationen, die als von einer Quelle stammend beurteilt werden können (vgl. Helbig & Ernst, in press), trotz Diskrepanz integriert werden, um ein kohärentes Abbild der

Umgebung zu bieten (z.B. Gepshtein et al., 2005; Marks, 2004), sollte das Verteilen der Aufmerksamkeit auf beide Modalitäten in einem größeren tolerierbaren Fehler resultieren; ein simultaner, direkter Vergleich beider Modalitäten bei Exploration eines Objektes sollte folglich zu höheren Toleranzen bezüglich der diskrepanten Darstellung führen. Dass Menschen in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit selektiv auf unterschiedliche Modalitäten zu richten, wurde bereits nachgewiesen (z.B. Spence, 2002). Werden jedoch nicht Sicht und Haptik direkt, d.h. parallel miteinander verglichen, sondern die kongruente Darstellung sequentiell mit der inkongruenten, verschiebt sich die Aufmerksamkeitsfokussierung: Die beiden Reizdarbietungen können als unabhängig voneinander bewertet werden; dies sollte in einer reduzierten Toleranzgrenze für intermodale Abweichungen resultieren.

Hypothese X-1: Die Lenkung der Aufmerksamkeit beeinflusst das zu tolerierende Ausmaß intermodaler Diskrepanz, d.h. die Größe der Wahrnehmungsschwelle. Es wird erwartet, dass bei direktem parallelen Vergleich größere Diskrepanzen toleriert werden als bei sequentiellem Vergleich.

Das Phänomen der visuellen Dominanz (s. Abschnitt 6-3) wird auch bei der Erhebung der Grenzen der visuell-haptischen Integration erwartet und soll am Beispiel von Objektnachgiebigkeit untersucht werden. Bleibt die visuelle Modalität unverändert und sollen somit Abweichungen der haptischen Modalität von der visuell dargestellten Eindrucktiefe diskriminiert werden, wird erwartet, dass größere Diskrepanzen zwischen den Modalitäten unentdeckt bleiben. Wenn die visuelle Modalität die Referenz ist und Abweichungen der haptischen von der visuellen Darstellung detektiert werden sollen, wird erwartet, dass erst bedeutend größere Diskrepanzen wahrgenommen werden können als im umgekehrten Fall.

Hypothese X-2: Ist eine Modalität, d.h. die Sicht, die Referenz und werden Abweichungen der anderen Modalität, demzufolge der Haptik, detektiert, so sind größere intermodale Diskrepanzen nötig, um wahrgenommen werden zu können.

In Abschnitt 7-1-3 und 7-1-4 wurde gezeigt, dass, abhängig von der Darstellungsmodalität (visuell, haptisch), die Diskriminierungsleistung in Abhängigkeit des Standardreizes variieren kann: Ein höheres Auflösungsvermögen bei der visuellen Modalität bei sehr hohen Eindruckstiefen konnte gezeigt werden, während mit zunehmender Nachgiebigkeit das Auflösungsvermögen der haptischen Modalität tendenziell abnimmt. In Abschnitt 7-1-5 wurde nur bedingt ein geringer Einfluss der Standardnachgiebigkeit gefunden; eine Variation in Abhängigkeit der Modalität konnte nicht nachgewiesen werden. Es soll nun auch überprüft werden, inwiefern die Toleranzgrenze für intermodale Diskrepanzen neben der Standardnachgiebigkeit auch von der Modalität, die unverändert bleibt, beeinflusst wird.

Hypothese X-3: In Abhängigkeit der unveränderten Modalität und der Standardnachgiebigkeit variiert die intermodale Unterschiedsschwelle.

7-1-5-1 Methode

Versuchsdesign. Aufgrund der Fragestellung wurden zwei psychophysische Schwellenerhebungsmethoden umgesetzt: Sicht und Haptik wurden innerhalb eines Trials direkt und parallel miteinander verglichen (im Folgenden als Methode A bezeichnet) oder die bimodal kongruente Darstellung eines nachgiebigen Würfels wurde mit einer inkongruenten Darstellung sequentiell (durch Paarvergleich) dargeboten (im Folgenden als Methode B bezeichnet).

Erhebungsmethode wurde als Gruppenfaktor umgesetzt. Zusätzlich interessierte, inwiefern die intermodale Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit der in Abschnitt 7-1-2-2 benannten 7 Standardreize variiert, und ob die Modalität, die während des Testdurchgangs unverändert blieb (im Folgenden als Referenzmodalität bezeichnet), die intermodale Toleranzgrenze beeinflusst. Standardnachgiebigkeit und Referenzmodalität wurden als Innersubjektfaktoren umgesetzt. Demzufolge wurden pro Proband 14 intermodale Schwellen erhoben. Um die Testzeit gering zu halten, wurde die Erhebung auf zwei Sitzungen erstreckt: An jedem Testtag wurden je 7 Schwellen erhoben, die Reihenfolge der Darbietung wurde pro Proband randomisiert unter der zusätzlichen Bedingung, dass zwei aufeinander folgende Standardreize nicht dieselbe Referenzmodalität haben durften.

Der demographische Fragebogen wurde um eine gruppenabhängige Frage erweitert (s. Abbildung 7-14). In Gruppe B wurde die Reihenfolge der Abfrage (gefühlte und dann gesehene oder umgekehrt) über die Probanden variiert. Zusätzlich wurde den Probanden der Immersionsfragebogen vorgelegt (s. Anhang D).

Versuchsdurchführung. Der in Abschnitt 7-1-2-1 beschriebene Experimentalaufbau wurde um eine LED erweitert, die oberhalb des TFT-Monitors angebracht wurde und bei der Erhebungsmethode A die jeweilige Referenzmodalität signalisierte. Der genaue Ablauf unterschied sich, wie oben bereits angedeutet, in Abhängigkeit der Erhebungsmethode.

Methode A. Gruppe A wurde instruiert, die Diskrepanz zwischen visueller und haptischer Modalität bezüglich eines nachgiebigen Objektes zu untersuchen. Die Objekte wurden jeweils für 4 s mit einem Intertrial-Intervall von 2 s dargeboten. Reizpräsentationsbeginn sowie -ende wurde jeweils mit einem Tonsignal angekündigt. Mit Ende der Reizpräsentation gaben die Probanden über den Joystick ihre Antwort ein (Unterschied zwischen den Modalitäten wahrgenommen, keinen Unterschied wahrgenommen).

GRUPPE A

Was fiel Ihnen besonders leicht: Wenn sich nur das Gefühlte veränderte, aber das Gesehene gleich blieb, oder wenn das Gesehene sich veränderte und das Gefühlte gleich blieb?
Bitte entscheiden Sie sich für eine Möglichkeit:

das Gefühlte veränderte sich, das Gesehene blieb unverändert

das Gesehene veränderte sich, das Gefühlte blieb unverändert

beides fiel gleich schwer bzw. leicht

GRUPPE B

Auf was haben Sie während der Experimente besonders geachtet: auf das Gefühlte oder auf das Gesehene oder auf beides?
Bitte entscheiden Sie sich für eine Möglichkeit:

auf das Gefühlte

auf das Gesehene

auf beides genau gleich

auf beides, aber unterschiedlich. *Und zwar: ...* _____

Abb. 7-14 Gruppenspezifische Frage im demographischen Fragebogen.

Methode B. Gruppe B explorierte nacheinander zwei Objekte, von denen eines keinerlei Diskrepanz bzgl. visueller und haptischer Information seiner Nachgiebigkeit aufwies (Standardreiz), während das andere bzgl. visueller oder haptischer Information diskrepanz war. Beide Objekte wurden für je 4s mit einem Interstimulus-Intervall von 2s und einem Intertrial-Intervall von 2s dargeboten. Reizpräsentationsbeginn sowie -ende wurden jeweils mit einem Tonsignal angekündigt. Die Probanden beurteilten nach je zwei Reizpräsentationen, ob das zweite Objekt nachgiebiger oder weniger nachgiebig als das erste Objekt bzw. genauso oder genauso nachgiebig war (3-stufige Antwort).

Prozedur zur Erhebung der intermodalen Unterschiedsschwelle (DL). Zur Schwellenerhebung wurde bei beiden Methoden ein adaptives psychophysisches Verfahren gewählt, die Staircase-Prozedur (vgl. Abschnitt 3-1-2). Das Verfahren begann mit einem Vergleichsreiz, dessen visuell-haptische Diskrepanz bzgl. der Nachgiebigkeit bei 200% des jeweiligen Standardreizes lag, der sich über die Standardnachgiebigkeit und Referenzmodalität definierte. Die Diskrepanz wurde in Abhängigkeit der Antwort des Probanden schrittweise verringert oder erhöht. Bis zum 3. Umkehrpunkt lag die Schrittgröße bei 10% der Diskrepanz und wurde danach auf 3% Diskrepanz reduziert. Kongruente Reize (also 0% Diskrepanz) wurden mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% (Gruppe A) bzw. 5% (Gruppe B) eingestreut, ohne in die Berechnung der Schwelle einzugehen. Die Unterschiedsschwelle errechnete sich nach Klein (2001) als der Mittelwert der Vergleichsreize über alle 10 (Gruppe A) bzw. 6 (Gruppe B) Umkehrpunkte nach Reduzierung der Schrittgröße auf 3% Diskrepanz. Diese Definition der Unterschiedsschwelle entspricht einer 50% Performanz (vgl. Klein, 2001). Die Unterschiedsschwellen wurden an ihrem jeweiligen Standardreiz relativiert.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die Fragebogenwerte analysiert und mittels einer MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) getestet, ob sich die beiden Experimentalgruppen (Gruppen A, B) bezüglich der Personenvariable Immersive Tendenz voneinander unterschieden (s. Abschnitt 7-1-4-2). Als nächstes wurden die ermittelten Weber-Brüche deskriptiv dargestellt und die Fragestellungen anhand einer ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren Standardnachgiebigkeit und Referenzmodalität sowie dem Gruppenfaktor Methode geprüft (s. Abschnitt 7-1-4-3). Signifikanz wurde auf dem 5% Niveau getestet; Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden mit der Korrektur von Greenhouse-Geisser korrigiert, wenn nötig.

7-1-5-2 Stichprobe und Personenvariablen

Stichprobe. Am Experimentalblock X „Multimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit – Grenzen der Integration“ nahmen 32 Studenten der Technischen Universität, der Ludwigs-Maximilians-Universität sowie der Universität der Bundeswehr München teil. Alle Probanden waren Rechtshänder und normalsichtig oder trugen Brille und Kontaktlinsen. Die Hälfte der Probanden wurde zufällig einer der beiden Gruppen (A, B) zugewiesen, bei denen sich die verwendete psychophysische Methode zur Bestimmung der intermodalen Wahrnehmungsschwelle (Methode A, B) unterschied. 7 Probanden mussten von den weiteren Analysen ausgeschlossen werden, da zu viele Schwellenwerte fehlten. Das mittlere Alter in Gruppe A (11 Männer, 3 Frauen) lag bei 25 Jahren und bei 26 Jahren in Gruppe B (6 Männer, 5 Frauen).

Personenvariable. Für jeden Probanden wurden die beiden Faktoren aus dem Immersionsfragebogen berechnet (s. Tabelle 7-12). Die Stichprobenwerte liegen in einem Konfidenzintervall von 95% um die Werte der Eichstichprobe (s. Scheuchenpflug, 2001). Die beiden Gruppen (A, B) unterschieden sich signifikant und effektschwach bezüglich ihres Grads der Involvierung ($F(1,23)=5.66$, $p<0.05$; $\eta^2=0.212$), nicht jedoch bezüglich ihrer Involvierungstendenz ($F(1,23)=0.01$, $p=0.934$). Beide Faktoren korrelierten nicht signifikant mit den Daten.

Tabelle 7-12 Beide Faktoren des Immersionsfragebogens für beide Gruppen (A, B).

	Gruppe A		Gruppe B	
	MW	sd	MW	Sd
Emotionale Involvierung	25.3	5.9	25.1	7.9
Grad der Involvierung	22.5	6.1	17.2	4.5

Gruppenspezifische Frage. Wie in Abschnitt 7-3-4-2 beschrieben, beantworteten die Probanden im demographischen Fragebogen eine Frage bezüglich der Erfahrung während des Experiments. Da die Fragen sich in Abhängigkeit der Gruppe voneinander unterschieden, wird deren Beantwortung sowie der Einfluss der Antwort auf die Performanz getrennt betrachtet. Die Angaben der Probanden korrelierten nicht signifikant mit den Weber-Brüchen. Gruppe A. Die Probanden gaben an, dass ihnen die Aufgabe leichter gefallen war, wenn die haptische ($n=2$) oder die visuelle Modalität ($n=4$) Referenz war. Keine Präferenz berichteten die übrigen 8.

Gruppe B. Die Probanden gaben an, dass sie bevorzugt auf die haptische Modalität ($n=5$), die visuelle ($n=3$), auf beide Modalitäten gleich ($n=1$) bzw. auf beides unterschiedlich ($n=2$) geachtet hätten. Die Auswertung der schriftlichen Angabe zur Spezifizierung, inwiefern sie auf beide Modalitäten unterschiedlich geachtet hätten (vgl. Abbildung 7-14), ergab, dass die Probanden einer Modalität den Vorzug einräumten oder angaben, auf beide Modalitäten gleich geachtet zu haben, so dass die verbleibenden beiden Versuchspersonen den ersten drei Antwortkategorien zugeordnet wurden. Somit haben insgesamt 6 Probanden hauptsächlich auf die haptische und 3 auf die visuelle Modalität und 2 auf beide Modalitäten gleich geachtet.

7-1-5-3 Wahrnehmungsschwellen für intermodale Diskrepanzen.

Analyse der fehlenden Werte. Bei den aus den weiteren Analysen ausgeschlossenen Probanden (in Gruppe B 5 und in Gruppe A 2 Personen) konnten besonders bei visueller Referenz die Wahrnehmungsschwellen nicht ermittelt werden. Eine Analyse der Fragebogendaten ergab (s. Abbildung 7-14), dass die meisten Probanden aus Gruppe B angaben, auf die visuelle Modalität geachtet zu haben.

Deskriptive Betrachtung: Weber-Brüche. Die intermodale Wahrnehmungsschwelle wurde für alle 14 Standardreize berechnet (s. Tabelle 7-13). Die beiden Erhebungsmethoden A und B unterscheiden sich in der Höhe detektierbarer Diskrepanzen: Während bei direktem intermodalen Vergleich (Methode A) Diskrepanzen von ca. 85-128% nötig waren, konnten bereits Abweichungen zwischen den Modalitäten von ca. 55-65% erkannt werden. Darüber hinaus zeichnet sich besonders in Erhebungsmethode A ein Einfluss der Referenzmodalität auf die Wahrnehmungsschwelle ab: Bei visueller Referenz konnten ca. 128% Abweichung der haptischen Modalität nicht wahrgenommen werden.

Tabelle 7-13 Weber-Brüche in Abhängigkeit der Gruppe (A, B), der Standardnachgiebigkeit (Reize) sowie der Referenzmodalität: Es blieb entweder die haptische (H) oder die visuelle Modalität (V) unverändert

Reize	Gruppe A (n=14)				Gruppe B (n=11)			
	H unverändert		V unverändert		H unverändert		V unverändert	
	MW	sd	MW	sd	MW	sd	MW	sd
0.22 mm/N	96.02	60.30	140.21	103.66	76.73	25.56	91.84	30.14
0.42 mm/N	88.34	74.61	116.94	84.08	76.21	42.75	63.54	38.68
0.50 mm/N	106.08	70.84	128.28	158.94	49.91	30.91	82.54	32.13
0.85 mm/N	79.10	41.09	148.46	59.04	53.96	27.55	84.55	68.26
1.38 mm/N	99.86	43.45	135.16	102.28	52.16	24.29	55.41	16.61
2.45 mm/N	60.75	35.61	132.45	80.65	59.18	29.09	56.55	30.04
4.88 mm/N	67.48	65.40	97.40	58.80	54.34	44.02	92.53	60.06

In Abbildung 7-15 sind die Wahrnehmungsschwellen abgetragen. Es fällt ins Auge, dass der Faktor Referenzmodalität bei Erhebungsmethode B die intermodale Schwelle bei einigen Standardreizen beeinflusst; außerdem führt Methode B im Vergleich zu Methode A nicht nur zu einer höheren Detektionsleistung intermodaler Abweichungen, sondern zeigt zudem geringere Standardabweichungen.

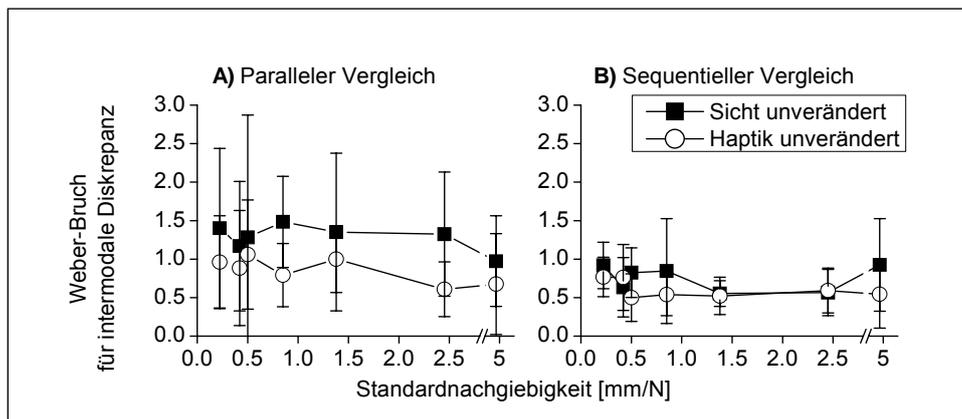


Abb. 7-15 Weber-Brüche für intermodale Diskrepanzen für beide Erhebungsmethoden: Wenn A) Sicht und Haptik parallel bzw. B) die bimodal kongruente Darstellung mit der inkongruenten verglichen wurden.

Testen der Hypothesen. Um die aufgestellten Hypothesen zu testen, wurde eine ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren Referenzmodalität (visuell, haptisch) und Standardreiz (7 Abstufungen) sowie dem Zwischengruppenfaktor Methode (Gruppe A, B) berechnet. Die F-Statistiken können Tabelle 7-14 entnommen werden.

Sowohl Referenzmodalität als auch der Gruppenfaktor Methode beeinflussen die Performanz, wenn auch effektschwach. Kein anderer Effekt erreicht statistische Signifikanz. Um den Einfluss der Referenzmodalität unabhängig vom Gruppenfaktor zu betrachten, werden zwei zweifaktorielle ANOVAs getrennt für beide Gruppen berechnet. In Gruppe B wird der Haupteffekt Modalität nicht statistisch signifikant ($F(1,10)=1.15$, $p=0.308$). Bei Gruppe A beeinflusst die Referenzmodalität statistisch bedeutsam die Weber-Brüche ($F(1,13)=10.33$, $p<0.05$; $\eta^2=0.443$): Ist die visuelle Modalität Referenz, nimmt die Performanz ab, d.h. die Toleranzgrenze zu.

Tabelle 7-14 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA. Freiheitsgrade mit (*) gekennzeichnet wurden mit der Greenhouse-Geisser Korrektur korrigiert.

	F (df)	p	η^2
HE Referenzmodalität	9.48 (1,23)	< 0.05	0.292
HE Gruppe	8.58 (1,23)	< 0.05	0.272
WW Modalität x Gruppe	3.85 (1,23)	0.062	0.143
WW Standardreiz x Gruppe	1.23 (3,69)*	0.304	0.051
WW Modalität x Standardreiz x Gruppe	1.01 (6,138)	0.419	0.042
HE Standardreiz	0.90 (3,69)*	0.445	0.038
WW Modalität x Standardreiz	0.75 (6,138)	0.607	0.032

Zusammenfassung. Die Wahrnehmungsschwellen für die minimal wahrnehmbare intermodale Diskrepanz bei unterschiedlich nachgiebigen virtuellen Würfeln wurden für unterschiedliche Standardnachgiebigkeiten und für beide Referenzmodalitäten getrennt erhoben. Die Methode der Erhebung unterschied sich in den beiden Versuchsgruppen: Während Gruppe A direkt die Referenzmodalität mit der sich verändernden Vergleichsmodalität verglich, beurteilte Gruppe B im indirekten Vergleich zwei nacheinander präsentierte Würfel, die sich bezüglich ihrer Diskrepanz unterschieden. Wie erwartet (Hypothese X-1), unterschied sich die minimal wahrnehmbare Diskrepanz in beiden Versuchsgruppen: Bei direktem Vergleich waren größere Diskrepanzen nötig (128% Unterschied), als bei indirektem Vergleich (55% Unterschied).

Darüber hinaus wurde ein genereller Einfluss sensorischer Dominanz erwartet (Hypothese X-2), der sich jedoch auf einen signifikanten Unterschied in den Wahrnehmungsschwellen der Gruppe A zurückführen ließ: Bei visueller Referenz nahmen die Schwellen zu. Der Einfluss sensorischer Dominanz, bzw. visueller Dominanz, war dabei nicht abhängig von der präsentierten Standardnachgiebigkeit (Hypothese X-3).

Bemerkenswert ist der Einfluss der beachteten Modalität in Gruppe B: Blieb die visuelle Modalität unverändert, korrelierte für einige Standardnachgiebigkeiten die Wahrnehmungsschwelle mit der Angabe der beachteten Modalität. Hierbei zeigte sich, dass die Performanz schlechter war, wenn auf die visuelle Modalität (fälschlicherweise) geachtet wurde. Die Analyse fehlender Werte zeigte, dass gerade jene Versuchspersonen aus der weiteren Berechnung ausgeschlossen werden mussten (da keine Schwellenbestimmung möglich war), wenn sie bevorzugt auf die visuelle Modalität geachtet hatten. Diese Ergebnisse stehen auch in Einklang mit der Literatur: Wird die falsche Modalität beachtet, erhöht sich die Reaktionszeit (vgl. Spence, Nicholls & Driver, 2001; Guest et al., 2002), bzw. führt wie in diesem Experiment ansatzweise erkennbar zu einem Nicht-Erkennen von Unterschieden in der Diskrepanz.

7-1-5-4 Grenzen der Integration und die Herstellungsmethode

In den vorangegangenen Abschnitten war gezeigt worden, dass die intermodale Wahrnehmungsschwelle von der Lenkung der Aufmerksamkeit abhängt. Darüber hinaus wurde insbesondere auch für die visuelle Diskriminierungsleistung eine Beeinflussung durch die Erhebungsmethode gezeigt, die zu einem der Literatur vergleichbaren Weber-Bruch führte, wenn der Proband die wahrgenommene Standardeindrucktiefe direkt und selbst herstellen konnte. Im folgenden Abschnitt soll geklärt werden, ob eine direkte Schwellenerhebung sich ebenfalls auf die Höhe der ermittelten intermodalen Schwelle auswirkt. Auf den intermodalen Fall angewandt bedeutet das, dass eine in eine inkongruente Modalität innerhalb einer bimodalen Darbietung (simultan) angepasst wird, bis subjektiv kein Unterschied mehr zum kongruenten Standard wahrgenommen werden kann³¹. Auch für die Erhebung der Grenzen bimodaler Wahrnehmung über die Herstellungsmethode sollte, wie bereits teilweise in Abschnitt 7-1-6-3 nachgewiesen, ein Einfluss der Referenzmodalität auf die Höhe der intermodalen Schwelle repliziert werden (Hypothese X-2).

Darüber hinaus wird zusätzlich erwartet, dass sensorische Dominanz sich auf eine weitere Art zeigt: Die intermodale Wahrnehmungsschwelle kann als intermodaler Vergleich aufgefasst werden: Während bei gewöhnlichen Diskriminierungsaufgaben Vergleiche innerhalb einer Modalität angestellt werden, ist bei der Erhebung der Diskrepanzschwelle der Vergleich zwischen zwei Modalitäten erforderlich; kurz: der Standardreiz ist modalitätsabhängig. Direkter intermodaler Vergleich wird auch bei cross-modalem Matching verlangt (s. Abschnitt 3-3-2); simultane oder sukzessive Darbietung führte dabei zu keinem unterschiedlichen Effekt (z.B. Woods, O'Modhrain & Newell, 2004). Meist findet sich eine Unterlegenheit des cross- gegenüber dem intramodalen Matching (z.B. Salmoni & Sullivan, 1976; Connolly & Jones, 1970; Björkman, 1967; nicht jedoch: Woods, O'Modhrain & Newell, 2004; Lechelt & Verenka, 1980). Zusätzlich war die visuelle Modalität beim unimodalen (resp. intramodalen) Matching der haptischen überlegen (z.B. Woods, O'Modhrain & Newell, 2004; Milewski & Iaccino, 1982; Salmoni & Sullivan, 1976; McDonnell & Duffett, 1972; Connolly & Jones, 1970). Beim cross-modalen Matching zeigte sich oft eine Asymmetrie: Das haptische Matchen des visuellen Standards war dem visuellen Matchen des haptischen Standards unterlegen (z.B. Connolly & Jones, 1970). Für simultanes intermodales Matching wird desgleichen angenommen, dass sich die Schwelle im Vergleich zum intramodalen (unimodalen) Matching erhöht.

Hypothese X-4: Die bimodale Schwellenerhebung führt durch Hinzufügen einer unveränderten Modalität zu einer Erhöhung der unimodalen Schwelle (die im bimodalen Fall der Variation der Vergleichsmodalität entspricht).

Methode.

Versuchsdesign. Um die Fragestellungen testen zu können, wurde eine Umsetzung der Referenzmodalität erforderlich: Während eine Modalität unverändert blieb, sollte beim Vergleichsreiz das Einstellen der jeweils anderen, der sog. Vergleichsmodalität, erlaubt sein. Es ergeben sich somit die beiden Bedingungen: Visuelle Referenz (vH) und haptische Referenz (hV).

Zusätzlich wurden, um Reaktionstendenzen zu verhindern, die Reizintensitäten bei der ersten Präsentation des Vergleichsreizes variabel gewählt. Die Startdiskrepanzen (d.h. die Ab-

³¹ Dieses Verfahren ist nicht mit cross-modalem Matching (s. Abschnitt 3-3-2) zu verwechseln, bei dem sequentiell die wahrgenommene Information aus der einen Modalität in eine andere Modalität übertragen wird

weichungen der Vergleichs- von der Referenzmodalität) liegen bei 160%, 155%, 150%, 145% und 140% jeweils ober- und unterhalb der Schwelle. Zusätzlich wurden Dummy-Würfel definiert, welche eine Standardnachgiebigkeit von 0.5 mm/N aufwiesen und mit 5 unterschiedlichen Startdiskrepanzen umgesetzt wurden (140% bei vH, Hv; 150% bei vH, hV; 160% bei vH). Die Schwellenerhebung erfolgte in einem Block zusammen mit den in Abschnitt 7-1-3 besprochenen unimodalen Blöcken (visuell, haptisch). Die Modalitätsbedingungen waren Innersubjektfaktoren. Die einzelnen startreizabhängigen Reizdarbietungen innerhalb eines jeden Blocks sowie die Reihenfolge der Blöcke wurden randomisiert.

Versuchsdurchführung. Die Versuchsdurchführung entspricht der in Abschnitt 7-1-3-2 beschriebenen. Die mittlere LED (s. Abbildung 7-15) zeigte dieses Mal die jeweilige Referenzmodalität an. Der Fragebogen zu Testende wurde um eine Frage erweitert (s. Abbildung 7-14 Gruppe A).

Prozedur zur Erhebung der bimodalen Unterschiedsschwelle (DL). Die Darbietung des Standard- und Vergleichsreizes erfolgte in beiden Modalitäten: Jeweils eine Modalität des Vergleichsreizes blieb während der Eingabe des Probanden als Referenzmodalität unverändert, die andere konnte durch den Probanden direkt über einen Drehknopf so eingestellt werden, dass sie dem bimodalen Standard entsprach.

Alle 10 individuellen Settings des Vergleichsreizes wurden aufgezeichnet; der Mittelwert der so erhaltenen Häufigkeitsverteilung wurde berechnet und ist (s. Abschnitt 3-1-2-1) als PSE definiert. Das Maß seiner Streuung (Standardabweichung) wurde nach Formel (4) berechnet und definiert den DL.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die Ergebnisse der spezifischen Fragebogenfrage wiedergegeben (für die Stichprobenbeschreibung s. Abschnitt 7-1-3-2). Die Unterschiedsschwelle (DL) wurde an der Standardnachgiebigkeit relativiert. Die Hypothesen wurden (s. Abschnitt 7-1-3-3) über eine 2-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren eingestellte Modalität (visuell, haptisch) sowie Anzahl dargestellter Modalitäten (uni-, bimodal) geprüft. Signifikanz wurde auf dem 5% Niveau getestet; Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden mit der Korrektur von Greenhouse-Geisser korrigiert, wenn nötig.

Ergebnisse.

Spezifische Fragebogenfrage. Die Probanden gaben an, dass Ihnen das Herstellen des Vergleichsreizes leichter gefallen war, wenn eine Veränderung in der haptischen (n=2) oder der visuellen Modalität (n=13) aufgetreten war. Die übrigen 5 Probanden gaben an, dass ihnen die Aufgabe in beiden Fällen gleich leicht bzw. schwer gefallen war. Es ergab sich keine Korrelation mit den Weber-Brüchen.

Bimodale Wahrnehmungsschwelle. In Abbildung 7-16 sind die bimodalen Wahrnehmungsschwellen zusammen mit den unimodalen Unterschiedsschwellen dargestellt: Bei haptischer Referenz stellten die Probanden demzufolge die visuelle Modalität des Vergleichsreizes so ein, dass der Vergleichsreiz dem bimodalen Standard entsprach. Bei visueller Referenz stellten sie dementsprechend die haptische Komponente des bimodalen Vergleichsreizes so ein, dass er dem bimodalen Standard entsprach. In Abschnitt 7-1-3 war bereits eine Überlegenheit des visuellen über das haptische Matching im unimodalen Fall gezeigt worden. Auch bei bimodaler Darbietung zeigten sich geringere Weber-Brüche, wenn die visuelle Modalität verändert werden sollte (s. Abbildung 7-16).

Gegenüber der unimodalen Darbietung reduziert sich die Diskriminierungsleistung: Ca. 24.9% Abweichung bei haptischer und 34.9% bei visueller Referenz sind nötig, um einen Unterschied wahrnehmen zu können.

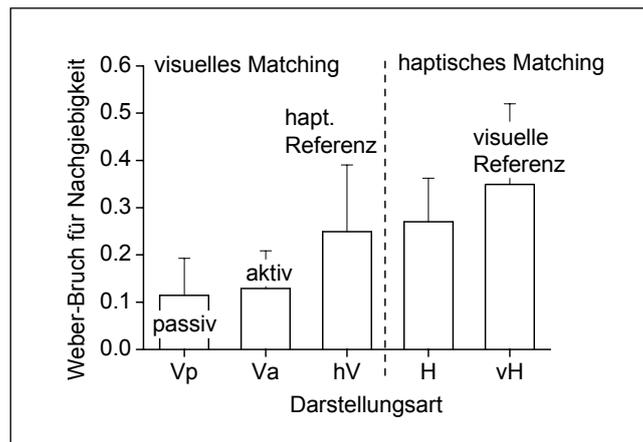


Abb. 7-16 Weber-Bruch bei visuellem und haptischem Matching eines unimodalen bzw. bimodalen Standardreizes. Visuelles Matching erfolgte entweder passiv oder durch aktives Eindringen des nachgiebigen Würfels. Bei der bimodalen Darbietung veränderte sich entweder die haptische oder die visuelle Modalität.

Mit einer zweifaktoriellen ANOVA war (s. Abschnitt 7-1-3-3) der Einfluss der einzustellenden sowie die Anzahl der dargebotenen Modalitäten auf die Unterschiedsschwelle getestet worden. Es hatte sich ein Einfluss der eingestellten Modalität gezeigt; um diesen Einfluss getrennt für die bimodale Darstellung zu testen, wurde erneut eine zweifaktorielle ANOVA, dieses Mal für die bimodale Darstellung, berechnet und bestätigte die Überlegenheit visuellen Matchings ($F(1,19)=18.03$, $p<0.05$; $\eta^2=0.487$), wie auch in Abbildung 7-16 gesehen werden kann. Die Interaktion zwischen einzustellender Modalität und Anzahl zurückgemeldeter Modalitäten war nicht statistisch signifikant geworden (s. Abschnitt 7-1-3-3). Die Anzahl zurückgemeldeter Modalitäten beeinflusste ebenfalls signifikant die Weber-Brüche ($F(1,19)=7.00$, $p<0.05$; $\eta^2=0.269$): Die Darbietung einer zusätzlichen Modalität resultierte in einer Reduzierung des Auflösungsvermögens.

Zusammenfassung.

Die über die Herstellungsmethode ermittelten intermodalen Wahrnehmungsschwellen liegen bei ca. 25% (haptische Referenz) und ca. 35% (visuelle Referenz). In Anlehnung an die vorausgegangenen Abschnitte war die Hypothese auch für die Schwellenerhebung durch die Herstellungsmethode getestet worden (Hypothese X-2), dass bei visueller Referenzmodalität und haptischem Matching die ermittelte Toleranzgrenze höher, also die Diskriminierungsleistung geringer ist. Diese Hypothese konnte erneut bestätigt werden: Größere Unterschiede zwischen Vergleichs- und Standardreiz waren nötig, um beide voneinander diskriminieren zu können, wenn der Vergleichsreiz haptisch eingestellt werden sollte. Zusätzlich war erwartet worden, dass auch das Darbieten einer weiteren Modalität die Diskriminierungsleistung beeinflusst (Hypothese X-4). Auch dies konnte bestätigt werden, wengleich auch mit geringerer Varianzaufklärung. Bei bimodaler Darbietung sind größere Unterschiede in der Darstellung nötig, um sie wahrnehmen zu können.

7-1-5-5 Diskussion

In Abschnitt 7-1-6 war die Frage nach den Grenzen der intermodalen Integration gestellt und über unterschiedliche psychophysische Methoden untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-15 zusammengefasst.

Um die intermodale Wahrnehmungsschwelle zu erheben, wurden drei verschiedene Methoden umgesetzt: Die Probanden verglichen entweder die visuelle und haptische Darstellung simultan miteinander und entschieden, ob sie eine Inkongruenz wahrnehmen konnten (Methode A), oder sie beurteilten, ob zwei nacheinander präsentierte Würfel, von denen einer inkongruent bezüglich seiner bimodalen Darstellung sein konnte, in ihrer bimodalen Umsetzung einander entsprachen (Methode B). Ein Unterschied war erwartet worden (Hypothese X-1) und konnte bestätigt werden (s. Tabelle 7-15): Größere Abweichungen zwischen den Modalitäten blieben unentdeckt, wenn die Probanden gezwungen waren, beide Modalitäten direkt miteinander zu vergleichen und somit ihre Aufmerksamkeit auf zwei Modalitäten gleichzeitig richten mussten (Methode A: 128-85%, Methode B: 68-55%). Können die Probanden die abweichende Modalität direkt so einstellen, dass sie keinen Unterschied mehr zur kongruenten Darstellung wahrnehmen (Herstellungsmethode), reduziert sich die intermodale Wahrnehmungsschwelle auf Weber-Brüche von 35-25%. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass intermodale Abweichungen besser detektiert werden können, wenn die Probanden Abweichungen zwischen kongruenter und inkongruenter Darstellung durch sequentiellen Vergleich detektieren (vgl. Marks, 2004; Gepstein et al., 2005).

Tabelle 7-15 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock X „Multimodale Wahrnehmung von Nachgiebigkeit – Grenzen der Integration“.

	Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
X-1	Die Lenkung der Aufmerksamkeit beeinflusst das zu tolerierende Ausmaß intermodaler Diskrepanz	bestätigt	Methode A, B: $\eta^2=0.27$
X-2	Ist die visuelle Modalität die Referenz und werden Abweichungen der haptischen Modalität detektiert, so sind größere intermodale Diskrepanzen nötig, um wahrgenommen werden zu können	bestätigt	Methode A: $\eta^2=0.44$ Methode B: $\eta^2=0.31$ Direkt: $\eta^2=0.49$
X-3	In Abhängigkeit der unveränderten Modalität und der Standardnachgiebigkeit variiert die intermodale Unterschiedsschwelle	n. bestätigt	
X-4	Die bimodale Schwellenerhebung führt durch Hinzufügen einer unveränderten Modalität zu einer Erhöhung der unimodalen Schwelle	bestätigt	$\eta^2=0.27$ (Herstellungsmethode)

Darüber hinaus war ein Einfluss der unveränderten Modalität erwartet worden, d.h. dass größere Abweichungen der haptischen Modalität von einer visuellen Referenz eher unentdeckt bleiben als umgekehrt (Hypothese X-2). Dies konnte für alle drei Erhebungsmethoden bestätigt werden (s. Tabelle 7-16). Ein zusätzlicher Einfluss des Standardreizes (s. Hypothese X-2) konnte in Abschnitt 7-1-6-3 nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 7-16 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Diskriminierungsfähigkeit von Unterschieden in der visuell-haptischen Darstellung, wenn die Abweichung der visuellen Eindringtiefe von der haptischen Darstellung der Nachgiebigkeit (A) oder die Abweichung der haptisch dargestellten Nachgiebigkeit von der visuellen Eindringtiefe (B) erhoben wurde.

	A) haptische Referenz	B) visuelle Referenz
Wertebereich	0.222 – 4.878 mm/N	0.222 – 4.878 mm/N
JND-%	25-85%	35-128%

Die Abhängigkeit der intermodalen Wahrnehmungsschwelle von der Referenzmodalität war erwartet worden und zeigte sich, wie in Tabelle 7-15 nachzulesen ist, unterschiedlich stark für die einzelnen Erhebungsmethoden. Am Beispiel der Standardnachgiebigkeit 0.851 mm/N, für die über alle drei Methoden die Toleranzgrenze für visuell-haptische Abweichungen ermittelt worden war, wurden die drei Erhebungsmethoden getrennt für die Referenzmodalitäten einander in Abbildung 7-17 gegenüber gestellt. Abweichungen in der visuellen Darstellung von der haptischen Umsetzung der Nachgiebigkeit können voneinander unterschieden werden, wenn die Inkongruenzen 79% (direkter Vergleich), 54% (sequentieller Vergleich) bzw. 25% (Herstellungsmethode) betragen. Deutlich höhere intermodale Inkongruenzen, nämlich 148% (direkter Vergleich), 85% (sequentieller Vergleich) bzw. 35% (Herstellungsmethode), sind nötig, um Abweichungen in der haptischen Darstellung von einer visuellen Eindrucktiefe detektieren zu können.

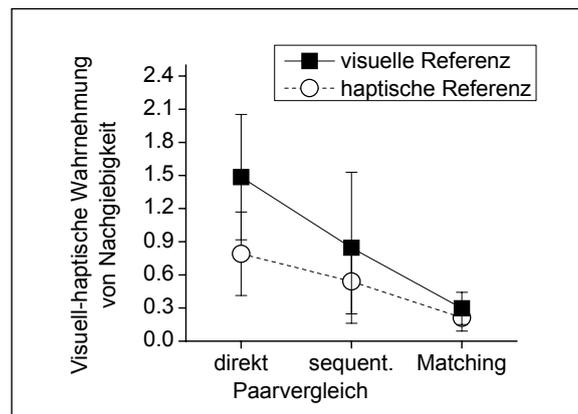


Abb. 7-17 Für eine Standardnachgiebigkeit von 0.851 mm/N wurde der eben-merkliche Unterschied zwischen visueller und haptischer Darstellung der Nachgiebigkeit (intermodale Weber-Brüche) mit unterschiedlichen psychophysischen Methoden (Paarvergleich, Herstellungsmethode) ausgehend von der Sicht (V konstant) oder der Haptik (H konstant) erhoben.

Inwiefern dieser Unterschied signifikant wird, wurde mit einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung auf dem Faktor Referenzmodalität und dem Gruppenfaktor *psychophysische Methode* auf dem 1%-Signifikanzniveau getestet. Die psychophysische Schwellenerhebungsmethode beeinflusste statistisch signifikant die Diskriminierungsleistung ($F(2,42)=37.04$, $p<0.01$; $\eta^2=0.683$): Bonferroni-post-hoc Vergleiche zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen allen drei Methoden (p -Werte < 0.01).

Zusätzlich war, wie auch schon durch Hypothese X-2 überprüft (s. Tabelle 7-15), bei haptisch unveränderter Nachgiebigkeit und variierender Eindrucktiefe die Diskriminierungsleistung überlegen ($F(1,42)=20.75$, $p<0.01$, $\eta^2=0.325$). Die Interaktion wird auf dem 1%-Signifikanzniveau gerade nicht statistisch signifikant ($F(2,42)=5.18$, $p=0.01$; $\eta^2=0.198$).

Zusammenfassend lässt sich demzufolge sagen, dass der Einfluss der Referenzmodalität weitgehend abhängig von der Lenkung der Aufmerksamkeit ist: Sollen Abweichungen der haptischen Modalität von der visuellen detektiert werden, bleiben durchgängig größere Unterschiede zwischen den Modalitäten unbemerkt. Die psychophysische Methode (und damit die Lenkung der Aufmerksamkeit) bestimmt die Höhe detektierbarer intermodaler Differenzen signifikant. Bereits geringe Abweichungen zwischen den Modalitäten können durch das direkte Verändern einer Modalität wahrgenommen werden. Diese erneute Reduktion der intermodalen Schwelle kann möglicherweise auf eine Erleichterung der visuellen Wahrnehmung der Eindrucktiefe zurückgeführt werden. Der Einfluss der psychophysischen Methoden auf die Bestimmbarkeit einer Unterschiedsschwelle für visuelle Eindrucktiefe wird im nächsten Abschnitt näher behandelt.

Darüber hinaus sind Inkongruenzen zwischen visueller und haptischer Darstellung dann tolerierbar, wenn sie weniger als 30-85% betragen. Um zu klären, inwiefern Diskrepanzen von wenigstens 30-80% sich auf das Präsenzerleben oder die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit auswirken und wie ihre Stärke beurteilt wird, wird eine erneute experimentelle Untersuchung nötig (s. Abschnitt 8-1).

7-1-6 Zusammenfassung

Haptisches Auflösungsvermögen. In Tabelle 7-17A sind die Ergebnisse zur Diskriminierungsfähigkeit visuell-haptischer Nachgiebigkeit aus Kapitel 7 zusammengestellt. Ungefähr 30% Unterschiede in der haptisch dargestellten Nachgiebigkeit können über einen breiten Wertebereich diskriminiert werden. Das Auflösungsvermögen von Nachgiebigkeit in der haptischen Modalität wurde über ein Staircase-Verfahren (s. Abschnitt 7-1-4-1), über die Konstanzmethode (s. Abschnitt 7-1-4-5), sowie über die Herstellungsmethode (s. Abschnitt 7-1-3) untersucht. Die Weber-Brüche für eine Standardnachgiebigkeit in allen drei Experimentalblöcken, d.h. 0.851 mm/N, liegen bei 27% (Staircase), 25% (Konstanzmethode) und 27% (Herstellungsmethode). Die Art der psychophysischen Erhebungsmethode beeinflusste nicht signifikant die Diskriminierungsfähigkeit ($F(2,47)=0.09$, $p=0.918$), wie über eine ANOVA mit dem Gruppenfaktor Methode getestet wurde.

Tabelle 7-17 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Diskriminierungsfähigkeit von Nachgiebigkeit allein in der haptischen Modalität (A) bzw. bei bimodaler Darbietung (C) sowie bei rein visueller Darbietung der Eindrucktiefe (B).

	A) Haptisch	B) Visuell	C) Bimodal
Wertebereich	0.222 – 4.878 mm/N	3-30 mm	0.222 – 1.379 mm/N (haptisch) 3-30 mm (visuell)
Untersuchungen	(II), VIII, IXa, IX	IXb (IX)	IX
JND-%	30%	12%	30%

Visuelles Auflösungsvermögen (von Eindrucktiefe). Soll die Eindrucktiefe der Fingerkuppen in einen (nachgiebigen) Würfel visuell diskriminiert werden, so beeinflusst die Art der Exploration (aktives visuelles Eindringen des Würfels vs. passives Betrachten der Eindrucktiefe) das Auflösungsvermögen nicht (s. Abschnitt 7-1-3). Wie jedoch bereits erwähnt wurde, zeigt sich eine unterschiedliche Diskriminierungsleistung in Abhängigkeit der verwendeten psychophysischen Methode. Der Weber-Bruch für visuelle Eindrucktiefe wurde über ein Staircase-Verfahren (s. Abschnitt 7-1-4-2), über die Konstanzmethode (s. Abschnitt 7-1-4-5), sowie über die Herstellungsmethode (s. Abschnitt 7-1-3) untersucht. Äquivalent zu der zuvor besprochenen haptisch dargestellten Standardnachgiebigkeit von 0.851 mm/N wurde eine visuelle Eindrucktiefe bestimmt, für die wiederum die Weber-Brüche verglichen werden können: Sie liegen bei 31% (Staircase), 53% (Konstanzmethode), 13% (Herstellungsmethode). Die Art der psychophysischen Erhebungsmethode beeinflusst statistisch signifikant die Diskriminierungsfähigkeit ($F(2,47)=14.01$, $p<0.05$; $\eta^2=0.374$) wie über eine ANOVA mit dem Gruppenfaktor Methode getestet wurde; Bonferroni-post-hoc Vergleiche zeigten signifikante Unterschiede zwischen allen Methoden (p -Werte < 0.01). Dies deutet darauf hin, dass das Diskriminieren von visueller Eindrucktiefe bei völlig randomisierter Darbietung von Reizpaaren den Probanden am schwersten fiel (Konstanzmethode; vgl. Abschnitt 7-1-4-5: die größte Anzahl von Probanden mussten bei dieser Methode ausgeschlossen werden). Am leichtesten schien das direkte Einstellen der wahrgenommenen visuellen Eindrucktiefe für die Pro-

banden zu sein (s. Abschnitt 7-1-5): Die Ergebnisse der Herstellungsmethode entsprechen darüber hinaus den Befunden aus der Literatur und zeigen, dass die Probanden sich bei dieser Methode tatsächlich ausschließlich auf die visuellen Positionsinformationen konzentrieren konnten.

Bimodales Auflösungsvermögen und Modalitätsdominanz. Wie in Tabelle 7-17C ersichtlich und bereits in Abschnitt 7-1-4-5 angesprochen, können, wie bei rein haptischer Darbietung, ca. 30% Unterschiede in der visuell-haptisch dargestellten Nachgiebigkeit von Objekten diskriminiert werden. Damit scheint (zumindest in der in Abschnitt 7-1-4 berichteten Untersuchung) die Diskriminierung von Nachgiebigkeit nicht überlegen, wenn zusätzliche visuelle Informationen dargeboten werden. Dieser fehlende Nachweis eines überlegenen Auflösungsvermögens bei bimodaler Darstellung gegenüber der unimodalen Darstellung kann jedoch, wie bereits diskutiert, auf die eingeschränkte Diskriminierungsleistung innerhalb der visuellen Modalität, bedingt durch eine Erschwerung aufgrund methodischer Effekte, zurückzuführen sein. Darüber hinaus zeigt sich ein bedeutend stärkerer Einfluss der haptischen Modalität (s. besonders Abschnitt 7-1-4-6).

Diese Abhängigkeit der visuellen Diskriminierungsleistung von der verwendeten psychophysischen Methode kann auf die Schwierigkeit, sich bei der visuellen Wahrnehmung der Eindrucktiefe allein auf die Positionsinformationen zu konzentrieren, zurückgeführt werden. Auch die Unterschiede bezüglich der intermodalen Wahrnehmungsschwelle (s. Abschnitt 7-1-6) lassen sich teilweise auf die Schwierigkeit, visuelle Eindruckstiefen diskriminieren zu können, zurückführen; das direkte Verändern einer Modalität ermöglicht einen aktiven und schnellen Vergleich beider Modalitäten miteinander (Herstellungsmethode), während bei fehlender Möglichkeit, eine Modalität direkt zu verändern (Methode A), die höchsten Abweichungen unbemerkt bleiben. Dies wiederum resultiert in einer für den Probanden weniger verlässlichen Darstellung: Er konzentriert sich stärker auf die haptische Modalität.

Es lässt sich also an dieser Stelle zusammenfassen, dass Abweichungen von weniger als 30% bei rein haptischer Darstellung von Nachgiebigkeit, von weniger als ca. 13% bei rein visueller Positionsinformation, sowie von weniger als ca. 30% bei kongruenter visuell-haptischer Information über die Nachgiebigkeit eines Objektes, nicht detektiert werden können.

Perzeptuelle Kongruenz und intermodaler Konflikt. Besonders bei der bimodalen Umsetzung von Objektnachgiebigkeit sind physikalische Abweichungen zwischen den Modalitäten relevant und können innerhalb bestimmter Grenzen kompensiert werden (perzeptuelle Kongruenz). Wie in Abschnitt 7-1-6 gezeigt werden konnte, hängen die detektierbaren Inkongruenzen von der Modalität ab: Stärkere Konflikte bleiben unentdeckt, wenn Abweichungen der haptischen Modalität von der visuellen identifiziert werden sollen. Diese Inkongruenzen können zwischen 25-150% betragen.

Da gewöhnlich bei Agieren in telepräsenten oder virtuellen Umgebungen eher Abweichungen zwischen den Modalitäten bemerkt werden dürften, wenn der Operator Sicht und Haptik miteinander vergleicht (also ein der Methode A ähnliches Suchverhalten zeigt), sind vermutlich deutlich höhere intermodale Schwellen tolerierbar, als über die Herstellungsmethode ermittelt (25-35%). Im folgenden Kapitel wird der Einfluss intermodaler Diskrepanzen auf u.a. das Präsenzerleben untersucht; Auswirkungen bemerkter intermodaler Inkongruenz sollten sich hierbei direkt abzeichnen.

7-2 Wahrnehmung von Objektkanten

7-2-1 Theoretischer Hintergrund

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Integration von Objektnachgiebigkeit als komplexe Variable untersucht: Während haptische Kraft- sowie redundant visuelle und haptische Positionsinformationen zur Gesamtwahrnehmung bimodaler Nachgiebigkeit verknüpft werden (vgl. Abbildung 7-2), erfordert bimodales Wahrnehmen von Objektkanten lediglich die Integration redundanter Positionsinformationen.

Es wurde bereits mehrfach beschrieben, dass bei multimodaler Wahrnehmung die durch die beteiligten sensorischen Systeme aufgenommenen unimodalen Informationen kombiniert und dabei gewichtet werden: Diese Gewichtung kann beispielsweise aufgrund der Reliabilität der einzelnen Modalitäten erfolgen (z.B. Ernst & Banks, 2002). Besonders bei der Wahrnehmung geometrischer Eigenschaften konnte visuelle Dominanz, d.h. eine stärkere Gewichtung der visuellen Modalität, nachgewiesen werden: Wie jedoch schon in Abschnitt 6-3 zusammengefasst wurde, sind die Befunde bezüglich der Wahrnehmung von Neigung uneinheitlich: Einige Forscher konnten visuelle Dominanz bestätigen (z.B. Ernst et al., 2000; Fishkin et al., 1975; Over, 1966), andere berichten keinerlei sensorische Dominanz (z.B. Rosas et al., 2005; Appelle, 1971).

Bisher wurde die Wahrnehmung von Objektkanten getrennt für beide Modalitäten untersucht (vgl. Gentaz et al., 2001; Lechelt et al., 1976). Eine unterschiedliche modalitätsabhängige Verarbeitung wurde u. a. von Essock (1980) diskutiert (s. a. Essock et al., 1997; Appelle, 1972). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass das Hinzufügen visueller Information die Wahrnehmungsverzerrung in der haptischen Modalität reduziert (z.B. Lakatos & Marks, 1998); dies kann evtl. auf eine visuelle Rekalibrierung zurückgeführt werden. Inwiefern sich jedoch die Diskriminierungsleistung bei Hinzufügen visueller Information verbessert und ob tatsächlich bimodale Wahrnehmung den beiden unimodalen überlegen ist, wurde nach Kenntnis des Autors für Objektkanten noch nicht überprüft.

Neben modalitätsabhängiger Diskriminierungsleistung sowie sensorischer Dominanz bei bimodaler Wahrnehmung ist ferner von Interesse, wie stark die Informationen beider Modalitäten voneinander abweichen dürfen, ehe der visuell-haptische Konflikt bemerkt wird. Darüber hinaus wurde bereits in Abschnitt 7-1-4 (vgl. auch Abschnitt 7-1-5) gezeigt, dass intermodale Wahrnehmungsgrenzen bei bimodalem Explorieren von Objektnachgiebigkeit von der Referenzmodalität beeinflusst werden können: Bei Variation der haptischen Modalität und Diskriminierung des Unterschieds zwischen visueller und haptischer Darstellung bleiben bei stärkerem Einfluss der visuellen Modalität höhere intermodale Diskrepanzen unentdeckt. Inwiefern dies auch bei der Wahrnehmung von Winkelgröße gilt, wurde bislang noch nicht untersucht.

Die drei Fragen (s. Kapitel 7-1-1) wurden durch zwei experimentelle Studien auch für Objektkanten untersucht und Gestaltung und Ergebnisse in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Dabei wird das für alle Experimente verwendete Experimentalsystem in Abschnitt 7-2-2 vorgestellt, Ausformung der Untersuchungen und Ergebnisdarstellung finden sich in den Abschnitten 7-2-3 und 7-2-4, und eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt dann in Abschnitt 7-2-5.

7-2-2 Experimentalumgebung

7-2-2-1 Human System Interface

Es wurde ein Experimentalsystem aufgebaut, über das Objektkanten visuell und haptisch sowie bimodal exploriert werden konnte (s. Abbildung 7-18). Es bestand aus zwei Komponenten, einem haptischen Ein-/Ausgabegerät, über das der Kontakt mit den Objektkanten haptisch rückgemeldet wurde, sowie einem TFT-Monitor, über den die visuelle Darstellung der virtuell generierten Kanten erfolgte.

Haptisches Subsystem. Bei dem haptischen Ein-/Ausgabegerät handelte es sich um das kommerziell erhältliche PHANTOM® Omni Desktop (SensAble Technologies, Inc., USA) mit drei Freiheitsgraden (3DOF). Die Position des Stylus (im Folgenden als Taststift bezeichnet) kann in alle drei Richtungen gemessen werden (Auflösung ca. 0.055 mm), Kraft kann in alle drei Richtungen rückgemeldet werden. Die maximal darstellbare Kraft liegt bei 3.3 N; der vom PHANTOM® vorgegebene x-y-z-Arbeitsraum umfasst mindestens 160 x 120 x 80 mm Breite, Höhe und Tiefe. Dass mit dem PHANTOM® psychophysische Grundlagenuntersuchungen möglich sind, zeigten bereits Hesse & Wing (1999).

Der Arbeitsraum wurde für die Experimente auf 2 Freiheitsgrade beschränkt, so dass alle Stimuli in der x-y-Ebene senkrecht zur Bewegungsrichtung dargestellt wurden (ohne Realisierung der z-Achse). Positionen wurden mit 1 kHz abgetastet. Die haptische Rückmeldung wurde über einen virtuellen magnetischen Anziehungseffekt realisiert und wie ein radiales Magnetfeld in einem Bereich von 15 mm um die Kante definiert (s. Abbildung 7-18).

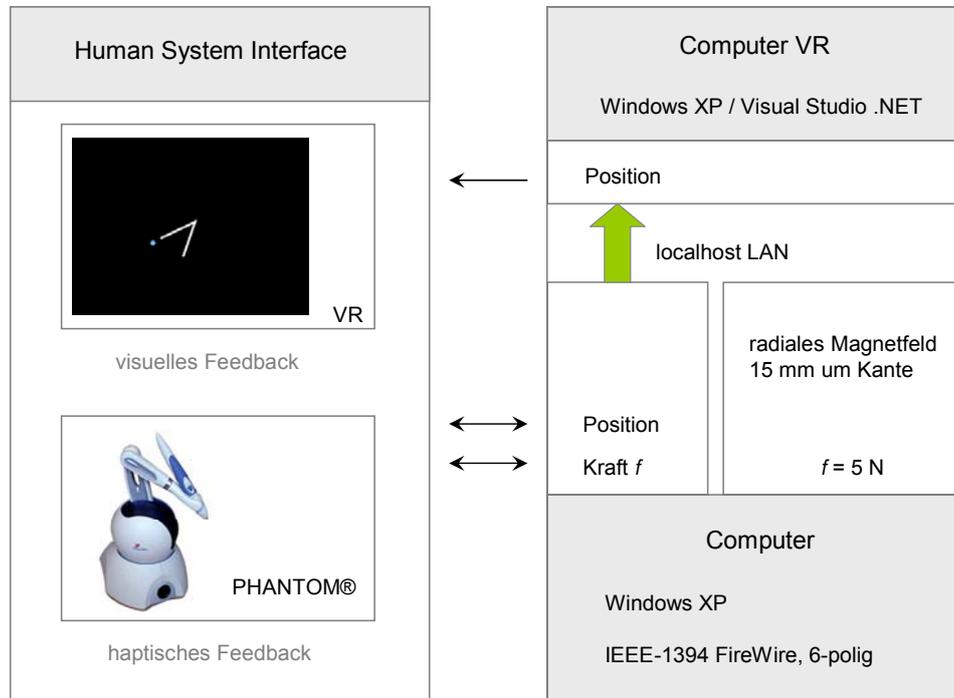


Abb. 7-18 Mensch-Maschine-Schnittstelle: Die Daten werden über eine simulierte LAN-Verbindung übertragen; die gerätebedingte Obergrenze für Force-Feedback liegt bei 5 N und beträgt durchschnittlich für die Probanden 1-2 N (vgl. Pongrac, in preparation).

Visuelles Subsystem. Visuelle Informationen wurden über einen TFT-Monitor (34 x 27 cm) ausgegeben (s. Abbildung 7-18); dieser wurde in 1.64 m Abstand zum Eingabegerät positioniert (in Abhängigkeit der Armlänge der Versuchsperson ergab sich demzufolge ein Gesamt- abstand von 180-205 cm). Der Monitor wurde mit einer kreisrunden Blende (Außendurchmesser 83 cm; Innendurchmesser 24 cm) versehen, um visuelle Cues durch die TFT-Umrandung auszuschließen (vgl. z.B. Chen & Levi, 1996; Onley & Volkman, 1958). Visuelle Stimuli wurden als zwei sich in einem Punkt treffende weiße Linien mit einer Winkelschenkel- länge von 29.3 mm und einer Liniendicke von 5 mm generiert. Die aktuelle Position des Taststifts wurde bei visuell-haptischer Darbietung zusätzlich visuell über einen beweglichen Cursor ausgegeben.



Abb. 7-19 Experimentalsystem für die Wahrnehmung von Objektkanten. Der Proband nimmt auf dem Stuhl links im Bild Platz und greift für die unimodal haptische sowie bimodale Darbietung den Taststift des PHANTOM® Device. Die visuellen Reize werden auf einem 1.5 m entfernt positionierten TFT-Monitor dargeboten.

7-2-2-2 Versuchsaufbau

Die Probanden nahmen so am HSI Platz, dass sie den Taststift des PHANTOM® Ein-/Ausgabegerätes nahezu rechtwinklig greifen und frei im Raum bewegen konnten. Ihre Antworten konnten sie über die Tastatur selbst eingeben.

Um zusätzliche visuelle Informationen auszuschließen, die bei der haptischen Wahrnehmung über die Beobachtung der eigenen Armbewegung entstehen könnten, wurde ein zusätzlicher Sichtschutz aufgestellt (s. Abbildung 7-19). Eine auditive Maskierung war nicht notwendig, da keine Störgeräusche ablenkend auftreten konnten.

Vor Testbeginn wurden die Probanden standardisiert instruiert und erhielten die Möglichkeit, sich mit dem PHANTOM® während der Trainingsphase vertraut zu machen. Dieses Training diente der Übung im Umgang mit dem Ein-/Ausgabegerät (s. Jansson & Billberger, 1999). Bei Testende wurden den Probanden Fragebögen vorgelegt, um neben demographischen Faktoren relevante Personenvariablen zu erheben.

7-2-3 Experimentalblock XI – Intermodale Integration und Einfluss der Positionierung

Dass uneinheitliche Ergebnisse zur sensorischen Dominanz bei der Diskriminierung von Winkelgrößen existieren, wurde bereits erläutert. Des Weiteren lassen sich deutliche Unterschiede bei der Wahrnehmung von Objektkanten (resp. Winkel oder Linienorientierung) zwischen den Modalitäten erkennen. Wie bereits in Abschnitt 4-3-1 beschrieben, können Winkelgrößen über 90° haptisch diskriminiert werden, wenn sie mindestens um 7% voneinander abweichen (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006; Henriques & Soechting, 2003; Voisin et al., 2002a; Appelle, 1971), während mehr als doppelt so große Unterschiede nötig sind, um Winkelgrößen unter 60° voneinander unterscheiden zu können (vgl. Wijntjes & Kappers, 2006; Appelle, 1971). Dieses Ergebnis konnte durch eigene Untersuchungen bestätigt und erweitert werden (vgl. Abschnitt 4-3): Bei der haptischen Wahrnehmung beeinflusste die Stimulusart die Weber-Brüche nicht, d.h. ob Winkelgröße anhand von Objektkanten oder durch Balkenlage relativ zur Horizontalen dargestellt wird. Auch sind bereits propriozeptive Informationen allein (d.h. ohne zusätzliche taktile Informationen) ausreichend (s. Abschnitt 4-3).

Wie in Abschnitt 4-3-1 zusammengefasst, wird auch der visuelle Oblique-Effekt der Klasse 1 für Linienorientierung und Winkelgröße nachgewiesen: Er ist stärker von der Stimulusart abhängig und tritt deutlicher bei Linien unterschiedlicher Orientierung auf (z.B. Chen & Levi, 1996; Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993). Im Vergleich zur haptischen Diskriminierung von Winkelgröße lassen sich bei visueller Darbietung deutlich geringere Unterschiedsschwellen nachweisen (vgl. auch Gentaz et al., 2001; Lechelt et al., 1976): Weniger als 2% Abweichungen von 90° - oder 180° -Winkeln können wahrgenommen werden, während mehr als 10% für oblique Winkel nötig sind (z.B. Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Timney, 1984; Orban et al., 1984; Appelle, 1971).

Bei direktem Vergleich der Diskriminierungsleistung des haptischen und visuellen Systems bestätigte sich ein höheres Auflösungsvermögen im visuellen System (vgl. auch Gentaz et al., 2001; Essock et al., 1997; Lechelt et al., 1976). Auch konnte eine Reduzierung der haptischen Verzerrung bei zusätzlicher Darbietung visueller Information nachgewiesen werden (z.B. Lakatos & Marks, 1998). Es wird demzufolge ein Unterschied zwischen haptischer und visueller Diskriminierungsleistung erwartet: Die visuelle Modalität ist der haptischen bei der Wahrnehmung von Orientierungsinformationen überlegen. Zusätzlich sollte sich diese Überlegenheit in visueller Dominanz bei der Gesamtwahrnehmung äußern: Das Auflösungsvermögen bei bimodaler Darstellung sollte am reliabelsten sein (z.B. Ernst & Banks, 2002).

Hypothese XI-1: Die Diskriminierungsleistung ist abhängig von der Modalität: Die visuelle Modalität zeigt die höchste Diskriminierungsleistung, die haptische Modalität die geringste. Die Sensitivität der bimodalen Winkelwahrnehmung wird stärker von der visuellen Modalität beeinflusst.

Ein weiterer Effekt, der in Abschnitt 4-3-1 sowie 5-2-1 bereits angesprochen wurde, ist der Einfluss der Winkelgröße: Dieser sog. Oblique-Effekt führte zu einer Reduzierung der Diskriminierungsleistung wenn spitze Winkel im Vergleich zu rechten Winkeln dargeboten wurden. Dies zeigte sich bei visueller Diskriminierung von Winkelgrößen (vgl. Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993; Appelle, 1971) und auch innerhalb der haptischen Modalität (vgl. Wijntjes & Kappers, 2006; Gentaz et al., 2001; Luyat et al., 2001; Essock et al., 1997; Appelle, 1971; vgl. auch Abschnitt 4-3). Es wird erwartet, dass, unabhängig von der Modalität, das Auflösungsvermögen bei spitzen Winkeln dem von rechten Winkeln unterlegen ist.

Hypothese XI-2: Rechte Winkel können besser diskriminiert werden als spitze Winkel.

Wie bereits in Abschnitt 2-6-1 zusammengefasst, beeinflusste die Positionierung des Winkels im Raum die haptische Wahrnehmung nicht (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006; Voisin et al., 2002a; Tressoldi, 1989). Eine Beeinflussung der Explorationsbewegung jedoch wurde am Entstehen des Oblique-Effekts diskutiert (s. Abschnitt 2-6-1): Dieser Faktor könnte eine Ungenauigkeit einführen, die zu einem Einfluss der Positionierung des Winkels im Raum auf die Diskriminierungsschwelle beiträgt (vgl. Gentaz & Hatwell, 1998, 1996). Uneinheitliche Befunde lassen sich zum Einfluss der Positionierung auf die visuellen Wahrnehmung finden (z.B. Chen & Levi, 1996; Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993; Orban, et al., 1984; Kawabata, 1981).

Hypothese XI-3: Es zeigt sich ein modalitätsspezifischer Effekt der Winkelpositionierung.

7-2-3-1 Methode

Stimuli. In Anlehnung an Abschnitt 4-3 wurden je ein rechter (90°) und ein spitzer Winkel (45°) ausgewählt. Die Winkel konnten über das in Abschnitt 7-2-2 dargestellte HSI entweder rein haptisch, haptisch und visuell exploriert werden, oder wurden rein visuell dargeboten. Zwei Positionierungen wurden realisiert (s. Abbildung 7-20): Positionierung A repräsentierte eine horizontale Positionierung, wurde jedoch um die visuelle Diskriminierbarkeit zu erschweren um -5° von der Horizontalachse verschoben, während Positionierung B um 45° von der Horizontalachse verschoben wurde (vgl. z.B. Chen & Levi, 1996; Snippe & Koenderink, 1994; Voisin et al., 2002a; Wijntjes & Kappers, 2006; Tressoldi, 1989).

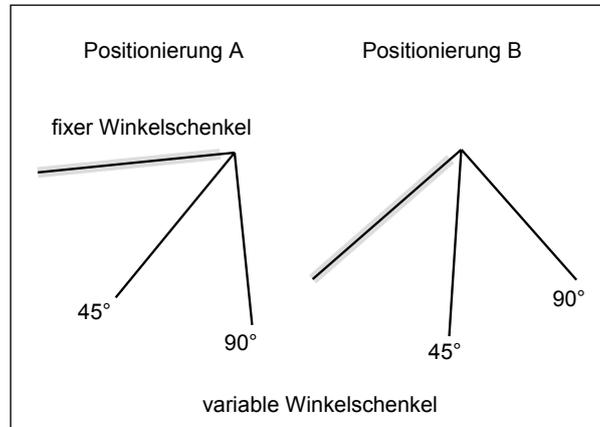


Abb. 7-20 Standardreize unterschieden sich in Standardwinkel (45° , 90°) sowie Positionierung (A, B). Ein Winkelschenkel blieb über die Schwellenbestimmung für jeden Winkel fix, während der andere in Abhängigkeit der Antwort des Probanden variabel angepasst wurde.

Versuchsdesign. Um die aufgezeigten Fragestellungen beantworten zu können, wurde die Unterschiedsschwelle (DL) für *Standardwinkel* von 45° und 90° erhoben, die entweder in *Positionierung A* oder *B* dargeboten wurden (s. Abbildung 7-20). Die Reize wurden in den unterschiedlichen *Modalitäten* präsentiert, d.h. visuell, haptisch sowie visuell und haptisch. Somit sind 12 Reizbedingungen zu testen; die 12 Unterschiedsschwellen wurden für jede Versuchsperson erhoben.

Die Probanden erhielten zu Testende sowohl den in Abbildung 7-9 dargestellten Fragebogen als auch den Immersionsfragebogen (s. Anhang D) zur Beantwortung.

Versuchsdurchführung. Ein Trial bestand aus der Präsentation von zwei Stimuli, von denen der eine Standard- und der andere Vergleichsreiz war. In Abhängigkeit der Modalität, in der die Reize präsentiert wurden, variierte die Reizpräsentationszeit (visuell: 1 s; haptisch: 5 s; visuell-haptisch: 3 s) sowie das Interstimulus-Intervall (visuell: 500 ms; haptisch und visuell-haptisch: 1 s). Das Intertrial-Intervall hing von den Probanden ab: Mit Eingabe der Antwort wurde das neue Reizpaar präsentiert. Die Auswahl der Darbietungsintervalle wurde an den Werten aus der Literatur angelehnt.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Der DL wurde über ein adaptives psychophysisches Staircase-Verfahren für die obere Schwelle erhoben (s. Abschnitt 3-1-2-2). In Anlehnung an die Literatur (s. Abschnitt 7-2-1) waren Startwerte sowie Schrittgrößen abhängig von der jeweiligen Modalität. Die visuelle sowie visuell-haptische Schwellenbestimmung begann mit einem Startwert von 15° (visuell) bzw. 20° (visuell-haptisch) oberhalb des Standardwinkels und mit einer Schrittgröße von 4°, die nach jeweils 2 Umkehrpunkten halbiert wurde. Der DL wurde als Mittelwert der letzten 6 Umkehrpunkte definiert. Aufgrund der höheren Schwellwerte bei der haptischen Schwellenerhebung (vgl. Abschnitt 4-3) wurde mit einem Startreiz von 30° oberhalb des Standardwinkels und einer Schrittweite von 12° begonnen. Jeweils nach 2 Umkehrpunkten wurde die Schrittweite halbiert. Der DL wurde als Mittelwert der letzten 6 Umkehrpunkte ermittelt. Der DL entspricht somit in beiden Fällen der 50%-Schwelle.

Statistische Analyse. In einem ersten Schritt wurden die durch das Staircase-Verfahren ermittelten Vergleichswerte in Weber-Brüche umgerechnet (s. Abschnitt 3-1-2) und die Ergebnisse deskriptiv dargestellt. Die Fragestellungen wurden mittels einer dreifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung auf den Faktoren *Modalität* (visuell, haptisch, bimodal), *Winkelgröße* (45°, 90°) und *Positionierung* (A, B) geprüft. Verletzungen der angenommenen Sphärizität wurden mit der Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert; das Signifikanzniveau wird auf 5% festgelegt.

Zuletzt wurde ermittelt, inwiefern die visuelle Modalität bei bimodaler Darbietung dominiert (V_{dom}), indem der Abstand zwischen bimodaler und haptischer Bedingung berechnet wurde. Dies erfolgt über die mittleren Unterschiedsschwellen MW_{DL} :

$$V_{dom} = \frac{MW_{DL}(VH) - MW_{DL}(H)}{MW_{DL}(V) - MW_{DL}(H)} \cdot 100 \quad (11).$$

Entspricht der Wert 100%, dominiert die Sicht; negative Werte können auf eine Reduzierung der bimodalen Bedingung im Vergleich zu den unimodalen zurückgeführt werden. Die Ergebnisse werden für jeden Probanden bestimmt, deskriptiv dargestellt und getrennt für beide Standardwinkel in t-Tests für abhängige Stichproben gegen die Nullhypothese getestet, dass V_{dom} signifikant von 100% (totale Dominanz) abweicht (1-seitige Testung).

7-2-3-2 Ergebnisse

Stichprobe. Am Experimentalblock XI „Wahrnehmung von Objektkanten – Intermodale Integration“ nahmen 19 Studenten und Mitarbeiter der Universität der Bundeswehr München teil. 3 Personen mussten aus der weiteren Erhebung ausgeschlossen werden, da zu viele Schwellwerte nicht bestimmt werden konnten. Im Mittel betrug das Alter der verbliebenen 16 Probanden (14 Männer, 2 Frauen) 24 Jahre. Alle Personen waren Rechtshänder und normalsichtig oder trugen eine Sehkorrektur. Nur ein Proband hatte bereits Erfahrung mit psychophysischen Experimenten.

Personenvariablen. Die Angaben der Probanden im Immersionsfragebogen auf den Faktoren, Grad der Immersion (MW = 20.1, sd = 5.4) und Emotionale Involvierung (MW = 25.1, sd = 4.7), unterschied sich nicht signifikant von den Werten der Normstichprobe (s. Scheuchpflug, 2001). Die Faktoren korrelierten nicht mit den Performanzdaten.

Die Probanden gaben an, bei der bimodalen Darstellung auf das Gefühlte (n=1) oder auf das Gesehene (n=15) geachtet zu haben; die Angaben korrelierten nicht mit den JND-%.

Die Probanden beurteilten die Natürlichkeit der Interaktion (MW = 5.4, sd = 1.3), die Möglichkeit sich aufgrund des Gesehenen (MW = 5.0, sd = 1.5) oder des Gefühlten (MW = 4.9, sd = 1.4) in die virtuelle Umgebung hinversetzt zu fühlen sowie die Übereinstimmung mit der Realität (MW = 5.1, sd = 1.1) als relativ hoch (höchster Wert „7“).

Die Unterschiedsschwellen (Weber-Brüche). In Tabelle 7-19 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Weber-Brüche für die Diskriminierung von Winkelgröße über das PHANTOM abgetragen. Die Diskriminierungsleistung für Winkelgröße erscheint relativ unabhängig von der Positionierung, zeigt jedoch eine Abhängigkeit von der Winkelgröße und Modalität.

Tabelle 7-19 Weber-Brüche in Abhängigkeit der Darstellungsart (visuell, haptisch, bimodal), der Positionierung sowie der Winkelgröße (45°, 90°).

		Positionierung A		Positionierung B	
		MW	sd	MW	sd
45°	Haptisch	0.22	0.24	0.20	0.28
	Visuell	0.05	0.04	0.03	0.02
	Bimodal	0.05	0.03	0.04	0.04
90°	Haptisch	0.09	0.11	0.07	0.04
	Visuell	0.01	0.01	0.03	0.02
	Bimodal	0.01	0.01	0.02	0.02

Wie in Abbildung 7-21 zu sehen, zeigt sich der Einfluss der Winkelgröße besonders bei der haptischen Modalität: 45°-Winkel können schlechter diskriminiert werden als 90°-Winkel. Eine ähnliche, wenngleich weniger deutliche Tendenz lässt sich auch für die visuelle Modalität finden. Am besten können Winkel diskriminiert werden, wenn sie visuell wahrgenommen werden; visuelle und bimodale Darbietung scheinen zu vergleichbarer Performanz zu führen (bzw. bei der Diskriminierung von rechten Winkeln sogar zu einer tendenziell höheren Performanz). Positionierung scheint keinen Einfluss auf die Diskriminierungsleistung zu haben.

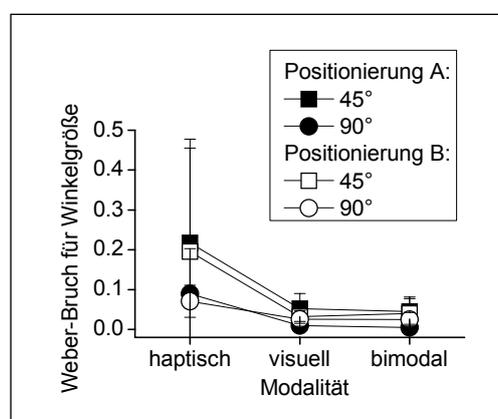


Abb. 7-21 Weber-Brüche in Abhängigkeit der Modalität und der Positionierung des Winkels für beide Winkelgrößen.

Der Einfluss der Modalität, der Positionierung sowie der Winkelgröße wurde in einer dreifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung geprüft (Ergebnisse s. Tabelle 7-20). Am meisten Varianz kann auf die Winkelgröße zurückgeführt werden: Winkel von 90° werden signifikant besser unterschieden als Winkel von 45°. Zusätzlich beeinflusste die Modalität, in der die Reize wahrgenommen wurden, die Weber-Brüche: Bonferroni-post-hoc Tests zeigten signifikante Unterschiede zwischen den Weber-Brüchen bei haptischer Exploration im Vergleich zu visueller ($p < 0.05$) oder bimodaler Exploration ($p < 0.05$). Visuelle und visuell-haptische Wahrnehmung der Winkelgröße unterschieden sich nicht signifikant voneinander ($p = 1.0$). Kein anderer Effekt der ANOVA wurde statistisch signifikant.

Tabelle 7-20 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA. Alle mit (*) gekennzeichneten Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	F (df)	p	η^2
HE Winkel (2)	12.24 (1,15)	< 0.05	0.449
HE Modalität (3)	8.36 (1.0,15.0)*	< 0.05	0.358
HE Positionierung (2)	1.48 (1,15)	0.243	0.090
WW Positionierung x Winkel	1.79 (1,15)	0.201	0.107
WW Positionierung x Modalität	3.59 (1.2,18.2)*	0.068	0.193
WW Winkel x Modalität	3.72 (1.0,15.2)*	0.072	0.199
3 fache Wechselwirkung	0.44 (1.1,16.5)*	0.535	0.028

Zuletzt wurde nach Formel (11) bestimmt, wie stark die visuelle Modalität dominiert. Für einen Probanden wichen die Werte deutlich (mehr als zwei Standardabweichungen) von denen der anderen ab; sie wurde deshalb aus der weiteren Analyse herausgenommen.

Tabelle 7-21 Statistiken der t-Tests: Die relativen visuelle Gewichtungen wurden gegen 100%-Dominanz getestet; zusätzlich wurde das Konfidenzintervall (KI) angegeben.

	t (df)	p	KI
$V_{dom}(45^\circ)$	0.58 (14)	0.573	[-110.5;-93.9]
$V_{dom}(90^\circ)$	1.80 (14)	0.094	[-136.9;-96.7]

Bei 45° Winkeln betrug V_{dom} 102%, bei 90° Winkeln 117%. In beiden Fällen ist die Unterschiedsschwelle (DL) bei bimodaler Darbietung demzufolge geringer (ein Unterschied der nicht statistisch signifikant wurde). Die visuelle Modalität dominiert die Gesamtwahrnehmung. Ob vollständige Dominanz vorliegt (100%), wurde mittels eines t-Tests überprüft. Die Ergebnisse können Tabelle 7-21 entnommen werden. Für keinen der beiden Standardwinkel lässt sich eine signifikante Abweichung von vollständiger visueller Dominanz nachweisen.

7-2-3-3 Diskussion

Um Unterschiede in der Winkelgröße detektieren zu können, sind bei visueller Darstellung ca. 5% (45°-Winkel) bzw. 2% (90°-Winkel) Abweichung vom jeweiligen Standardwinkel (45°, 90°) nötig; diese Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung zu Befunden anderer Forscher (z.B. Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Timney, 1984; Orban et al., 1984; Appelle, 1971). Das unimodal haptische Auflösungsvermögen ist deutlich geringer: Ca. 9% Abweichung von rechten Winkeln können detektiert werden, während ca. das Doppelte nötig ist, um spitze Winkel diskriminieren zu können; auch diese Ergebnisse entsprechen den Befunden aus der Literatur (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006; Henriques & Soechting, 2003; Voisin et al., 2002a; Appelle, 1971; vgl. auch Kapteitl 4-3). Die Ergebnisse der Untersuchung sind auch

in Tabelle 7-22 zusammengefasst.

Einfluss der Winkelgröße. Wie erwartet, beeinflusste die Winkelgröße das Auflösungsvermögen in der erwarteten Richtung (Hypothese XI-2): Rechte Winkel wurden signifikant besser diskriminiert als spitze Winkel (vgl. Wijntjes & Kappers, 2006; Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Buchanan-Smith, 1993; Appelle, 1971). Der erwartete Effekt geringerer Diskriminierungsleistung bei spitzen Winkeln konnte somit modalitätsunabhängig bestätigt werden (vgl. auch Lechelt et al., 1976).

Einfluss der Modalität. Ein modalitätsabhängiger Einfluss auf das Auflösungsvermögen von Winkelgröße war erwartet worden und zeigte eine Unterlegenheit der haptischen Diskriminierung im Vergleich zur visuellen (Hypothese XI-1). Diese Ergebnisse decken sich mit anderen Befunden zur visuellen bzw. haptischen Wahrnehmung von Winkeln bei Matching- oder Reproduktionsaufgaben (vgl. Gentaz et al., 2001; Lechelt et al., 1976).

Wird zusätzlich zur visuellen Modalität haptische Rückmeldung beim Entlangfahren der Kante gegeben, so zeigt sich eine Tendenz zu erhöhter Genauigkeit der bimodalen Wahrnehmung. Die bimodale Diskriminierungsleistung unterschied sich jedoch nicht signifikant von der visuellen: Es können unter 5% Unterschiede in der Winkelgröße diskriminiert werden. Bei zusätzlicher Darbietung der visuellen Modalität verbessert sich die haptische Wahrnehmung, während umgekehrt bei zusätzlicher Darbietung der haptischen Modalität die visuelle Wahrnehmung nicht beeinflusst wird. Vollständige visuelle Dominanz bei bimodaler Darbietung konnte gezeigt werden. Dies steht auch in Übereinstimmung mit der Literatur (z.B. Lakatos & Marks, 1998).

Einfluss der Positionierung. Obwohl ein modalitätsspezifischer Einfluss der Positionierung des Winkels auf das Auflösungsvermögen erwartet worden war (Hypothese XI-3), konnte der Effekt nicht bestätigt werden. Positionierung beeinflusste die Weber-Brüche nicht.

Tabelle 7-22 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock XI „Multimodale Wahrnehmung von Objektkanten – Intermodale Integration“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
XI-1 Die Diskriminierungsleistung ist modalitätsabhängig Die Sensitivität der bimodalen Winkelwahrnehmung wird stärker von der visuellen Modalität beeinflusst	bestätigt bestätigt	$\eta^2=0.36$
XI-2 Rechte Winkel können besser diskriminiert werden als spitze Winkel	bestätigt	$\eta^2=0.45$
XI-3 Es zeigt sich ein modalitätsspezifischer Effekt der Winkelpositionierung	n. bestätigt	

Zusammengenommen bedeutet dies, dass die Positionierung der Objektkanten die Diskriminierung nicht beeinflusst. In Abhängigkeit der Winkelgröße ist die Genauigkeit der Darstellung zu beachten.

7-2-4 Experimentalblock XII – Grenzen der Integration

Wie in Abschnitt 7-2-3 gezeigt werden konnte, ist die bimodale Diskriminierung von Objektanten genauso gut wie die unimodale visuelle, was einen starken Einfluss der visuellen Modalität annehmen lässt. Demzufolge sollte, wie schon in Abschnitt 7-1-5 gezeigt werden konnte, die visuelle Modalität auch bei der Bestimmung der intermodalen Wahrnehmungsschwelle eine Rolle spielen: Ein dominanter Einfluss der visuellen Modalität wird erwartet. Wird demzufolge bei einem sequentiellen Vergleich die haptische Modalität verändert, so sollten größere visuell-haptische Diskrepanzen unentdeckt bleiben, während geringere Abweichungen detektierbar sein sollten, wenn die haptische Modalität im sequentiellen Vergleich unverändert bleibt und nur die visuelle Modalität variiert.

Hypothese XII-1: Die Stärke der intermodalen Wahrnehmungsschwelle wird von der Referenzmodalität beeinflusst: Bei visueller Referenzmodalität ist die intermodale Wahrnehmungsschwelle höher.

Der Oblique-Effekt wurde für beide Modalitäten getrennt in der Literatur gezeigt (vgl. Abschnitt 4-3-1) und konnte auch im vorangegangenen Abschnitt bei einem Vergleich von 45°- und 90°-Winkeln bestätigt werden. Wie jedoch bereits in Abschnitt 4-3-1 diskutiert, und von Essock (1980) beschrieben worden war, unterscheidet sich dieser Effekt bei haptischen Diskriminierungsaufgaben (Klasse-1-Effekten) von visuellen Diskriminierungsaufgaben. Es wurde nicht generell eine Abnahme haptischer Diskriminierungsleistung bei stumpfen Winkeln gefunden (vgl. Wijntjes & Kappers, 2006; Voisin et al., 2002a; Appelle, 1971; s. Abschnitt 4-3). Demzufolge wird erwartet, dass sich bei zusätzlicher Erhebung der Unterschiedsschwelle eines stumpfen Winkels (135°) ein modalitätsabhängiger Einfluss des Standardwinkels zeigt: Das visuelle Auflösungsvermögen eines stumpfen Winkels ist dem eines spitzen Winkels vergleichbar und demzufolge gegenüber dem 90°-Winkel unterlegen (Oblique-Effekt); bei haptischer Diskriminierung konnte eine Unterlegenheit des Auflösungsvermögens v.a. bei spitzen, weniger jedoch bei stumpfen Winkel nachgewiesen werden.

Hypothese XII-2: Die wahrnehmbare intermodale Diskrepanz wird vom Standardreiz beeinflusst. Dieser Einfluss ist modalitätsabhängig: Wenn die visuelle Modalität die Referenzmodalität ist, sollte sich die intermodale Wahrnehmungsschwelle wie bei haptischen Diskriminierungsaufgaben verhalten, während die intermodalen Unterschiedsschwellen bei haptischer Referenz auf den Oblique-Effekt zurückzuführen sein sollten.

In Abschnitt 7-1-7 wurde bereits ein Ansteigen der bimodalen im Vergleich zur unimodalen Schwelle angesprochen. Da das Erheben der intermodalen Wahrnehmungsschwelle auch als paarweiser Vergleich bei zusätzlich dargebotener (irrelevanter) Information aus der anderen Modalität angesehen werden kann, wird erwartet, dass das Hinzufügen einer zweiten (unveränderten) Modalität das Auflösungsvermögen reduziert. Dies wiederum sollte in einer Reduzierung der Diskriminierungsfähigkeit resultieren.

Hypothese XII-3: Die bimodale Schwellenerhebung führt durch Hinzufügen einer Modalität, die unverändert bleibt, zu einer Erhöhung der unimodalen Schwelle (die im bimodalen Fall der Variation der Vergleichsmodalität entspricht).

Die visuelle Modalität scheint bei der Diskriminierung von Winkelgröße überlegen (s. Abschnitt 7-2-3) und bei reduzierter Reliabilität in der bimodalen Darstellung in einer reduzierten Performanz zu resultieren (z.B. Barbagli et al., 2006). Es wird daher erwartet, dass

die unimodale haptische Wahrnehmung bei zusätzlich, jedoch unverändert dargebotener visueller Information stärker beeinträchtigt wird als die unimodale visuelle Diskriminierungsleistung bei zusätzlich dargebotener (unveränderter) haptischer Information. Dieser Effekt konnte auch bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit (s. Abschnitt 7-1-5) nachgewiesen werden.

Hypothese XII-4: Es zeigt sich ein Einfluss der Referenzmodalität in Abhängigkeit der Anzahl dargebotener Modalitäten: Performanz ist geringer, wenn die visuelle Modalität Referenzmodalität ist.

7-2-4-1 Methode

Stimuli. Wie in Abschnitt 7-2-3 gezeigt, beeinflusste die Positionierung des Winkels die Genauigkeit bei der Diskriminierung der Winkel nicht. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf eine weitere Betrachtung der Positionierung verzichtet. Die in Abschnitt 7-2-3 verwendeten Winkelgrößen (45° , 90°) wurden um den 135° -Winkel erweitert und dienten in ihrer Positionierung A als Reizmaterial für die Standardwinkel (s. Abbildung 7-22). Alle Reize wurden bimodal präsentiert: Eine Reizserie bestand aus einem Set kongruenter und die zweite Serie aus inkongruenten Reizen. Inkongruenzen wurden erneut in Abhängigkeit einer Referenzmodalität (Darstellung des Standardwinkels) und der in seiner Winkelgradzahl abweichenden zweiten Modalität umgesetzt.

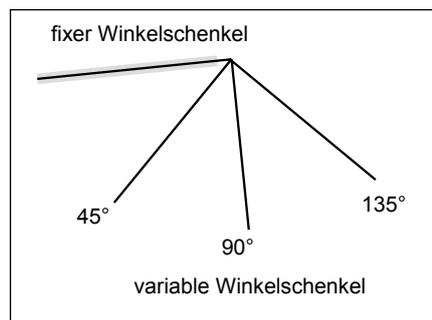


Abb. 7-22 Die Stimuli unterschieden sich in der Standardwinkelgröße (45° , 90° , 135°) und wurden in Positionierung A (s. Abschnitt 7-2-3) umgesetzt.

Versuchsdesign. Um die Fragestellungen beantworten zu können, wurden die Unterschiedsschwellen (DL) für drei *Standardwinkel*, d.h. 45° , 90° und 135° , erhoben. Zusätzlich wurde die *Referenzmodalität* (Sicht unverändert, Haptik unverändert) variiert. Alle 6 Reizbedingungen wurden von jedem Probanden getestet. Die Reihenfolge der Darbietungen wurde pro Proband randomisiert.

Bei Testende wurde den Probanden die in Abbildung 7-9 zusammengefassten Fragen sowie der Immersionsfragebogen vorgelegt (s. Anhang D).

Experimenteller Ablauf. Ein Trial bestand aus der Präsentation von zwei Stimuli, von denen einer bimodal kongruent (Standardreiz) und der andere bezüglich seiner Darstellung bimodal inkongruent dargeboten wurde. Die Reize wurden für 3 s mit einem Interstimulus-Intervall von 1 s dargeboten. Die Probanden verglichen beide Testreize miteinander und gaben über die Tastatur ein, ob sie einen Unterschied zwischen ersten und zweiten Reiz wahrgenommen hatten. Mit Eingabe der Antwort wurde das neue Reizpaar präsentiert.

Prozedur zur Erhebung der Unterschiedsschwelle (DL). Der DL wurde über ein adaptives psychophysisches Staircase-Verfahren für die obere Schwelle (s. Abschnitt 3-1-2-2) in starker Anlehnung an das in Abschnitt 7-2-3 beschriebene Verfahren erhoben. In Anlehnung an die Literatur (s. Abschnitt 7-2-1) waren Startwerte sowie Schrittgrößen abhängig von der jeweiligen Referenzmodalität. Die Schwellenerhebung unterschied sich in Abhängigkeit der Referenzmodalität (vgl. dazu Abschnitt 7-1-5). War die visuelle Modalität Referenzmodalität, wurde mit einem Startwert von 60° oberhalb des Standardwinkels begonnen. Die Schrittgröße wurde jeweils nach dem 2. Umkehrpunkt reduziert ($16^\circ - 10^\circ - 5^\circ - 3^\circ - 2^\circ - 1^\circ$). Der DL wurde als Mittelwert der letzten 6 Umkehrpunkte definiert. Bei haptischer Referenz, lag der Startwert bei 30° oberhalb des Standardwinkels und die Schrittgrößen wurden entsprechend verändert ($4^\circ - 3^\circ - 2^\circ - 1^\circ$). Der DL wurde als Mittelwert der letzten 6 Umkehrpunkte ermittelt. Damit entspricht die Unterschiedsschwelle der 50%-Schwelle.

Statistische Analyse. Zuerst wurden die Unterschiedsschwellen (DL) am Standardreiz relativiert und die Ergebnisse deskriptiv dargestellt. Mit einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung wurde der Einfluss der *Winkelgröße* sowie der *Referenzmodalität* auf die Weber-Brüche geprüft.

Die Ergebnisse für die intermodale Wahrnehmungsschwelle wurden mit den Ergebnissen der Unterschiedsschwelle aus Abschnitt 7-2-3 verglichen: Aus beiden Experiment wurden Teilstichproben entnommen (Experiment XI: Unimodale Schwellwerte der Positionierung A für Winkelgrößen von 45° und 90° ; Experiment XII: Intermodale Wahrnehmungsschwelle für Winkelgrößen 45° und 90°). Der Einfluss des *Standardwinkels* (45° , 90°) sowie der *Referenzmodalität* (visuell, haptisch) wurde mittels einer dreifaktoriellen ANOVA für beide Experimentalgruppen, dem Faktor *Anzahl der Modalitäten* (eine Modalität dargeboten, eine Modalität unverändert) geprüft. Verletzungen der angenommenen Sphärizität werden nach Greenhouse-Geisser korrigiert; das Signifikanzniveau wird auf 5% festgelegt.

7-2-4-2 Ergebnisse

Stichprobe. Am Experimentalblock XII „Wahrnehmung von Objektkanten – Grenzen der Integration“ nahmen 20 Studenten und Mitarbeiter der Universität der Bundeswehr München teil. 5 Personen mussten aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, da zu viele Schwellwerte nicht ermittelt werden konnten. Alle 15 Probanden (12 Männer, 3 Frauen) waren Rechtshänder und normalsichtig oder trugen eine Sehkorrektur. 6 Probanden hatten Erfahrung mit psychophysischen Experimenten. Das mittlere Alter der Stichprobe betrug 26 Jahre.

Personenvariablen. Die Angaben der Probanden im Immersionsfragebogen wurden getrennt für die beiden Faktoren Grad der Involvierung (MW = 18.7, sd = 3.4) und emotionale Involvierung (MW = 26.3, sd = 5.2) ausgewertet. Die Probanden unterschieden sich dabei weder in ihrer emotionalen Involvierung noch in dem Grad der Involvierung von den Angaben der Normstichprobe (s. Scheuchenpflug, 2001). Die Faktoren korrelierten nicht mit den Weber-Brüchen.

Die Probanden gaben an, auf das Gefühlte (n=3), auf das Gesehene (n=5) oder auf beides gleich (n=7) geachtet zu haben. Die Angabe der Modalität, auf die besonders geachtet worden war, korrelierte nicht signifikant mit der Performanz.

Die Probanden beurteilten die Natürlichkeit der Interaktion (MW = 4.9, sd = 1.2), die Möglichkeit sich aufgrund des Gesehenen (MW = 4.1, sd = 1.7) oder des Gefühlten (MW = 5.2, sd = 1.0) hinversetzt zu fühlen sowie die Übereinstimmung mit der Realität (MW = 5.1,

sd = 1.1) als relativ hoch (höchster Wert „7“). Dabei unterschied sich die Beurteilung nicht von den Einschätzungen der Gruppe mit durchweg kongruenter Darstellung (s. Abschnitt 7-2-3): Eine MANOVA mit dem Gruppenfaktor (Experiment XI, XII) zeigte keinen signifikanten Unterschied ($F(4,24)=1.0$, $p=0.418$).

Wahrnehmungsschwelle (Weber-Brüche). In Tabelle 7-23 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Weber-Brüche für die Detektionsschwelle intermodaler Abweichungen zusammengestellt. Es zeigt sich ein Einfluss der Referenzmodalität: Bleibt die haptische Modalität unverändert und variiert die visuelle, können Diskrepanzen in der Darstellung von unter 10% detektiert werden. Wird hingegen die haptische Modalität variiert, sind größere Abweichungen nötig.

Tabelle 7-23 Weber-Brüche in Abhängigkeit der Referenzmodalität, die während der Testung unverändert blieb.

	H unverändert		V unverändert	
	MW	sd	MW	sd
45°	0.09	0.05	0.47	0.20
90°	0.02	0.02	0.29	0.17
135°	0.03	0.02	0.10	0.07

Wie in Abbildung 7-23 zu sehen ist, zeigt sich der Einfluss der Winkelgröße besonders bei visueller Referenzmodalität und damit haptischer Vergleichsmodalität: Mit zunehmender Winkelgröße nimmt die Größe der Diskrepanzschwelle ab. Die geringsten intermodalen Unterschiede werden bei 135°-Winkeln detektiert. Darüber hinaus zeigt sich eine allgemeine Überlegenheit bei haptischer Referenz und Variation der visuellen Modalität. Der Einfluss der Referenzmodalität sowie des Standardwinkels wurde mit einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung geprüft (s. Tabelle 7-24). Am stärksten beeinflusst die Referenzmodalität die intermodale Detektionsschwelle: Bleibt die visuelle Modalität unverändert, sind stärkere Diskrepanzen in der visuell-haptischen Darstellung nötig. Variationen des Standardwinkels beeinflussten ebenfalls die intermodalen Weber-Brüche: Mit zunehmendem Standardwinkel nimmt die Diskriminierungsleistung zu. Auch die Interaktion wird statistisch signifikant und kann auf Variationen des Standardwinkels (mit zunehmendem Winkel nimmt die Wahrnehmungsschwelle ab) sowie der Referenzmodalität zurückgeführt werden: Bei visueller Referenz variiert die Diskriminierungsleistung stärker in Abhängigkeit des Standardreizes (s. Abbildung 7-23).

Tabelle 7-24 F-Statistiken der zweifaktoriellen ANOVA.

	F (df)	p	η^2
HE Standardwinkel (3)	12.24 (2,28)	< 0.05	0.762
HE Referenzmodalität (2)	63.89 (1,14)	< 0.05	0.820
WW Winkel x Modalität	34.65 (2,28)	< 0.05	0.712

Um den Trend in Abhängigkeit der Referenzmodalität zu prüfen, wurden zwei getrennte ANOVAs gerechnet. Der Haupteffekt Standardwinkel wird statistisch signifikant, wenn die visuelle Modalität Referenz ist ($F(2,28)=41.73$, $p<0.05$; $\eta^2=0.749$) und kann auf einen linearen Trend zurückgeführt werden ($F(1,14)=65.18$, $p<0.05$; $\eta^2=0.823$). Dies wird auch in Abbildung 7-23 ersichtlich. Bleibt die haptische Modalität unverändert, beeinflusst ebenfalls der Standardwinkel die intermodale Wahrnehmungsschwelle (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.2,16.9)=23.18$, $p<0.05$; $\eta^2=0.623$). Wie in Abbildung 7-23 erkennbar, ist die höchste Sensitivität bei 90°-Winkeln und die geringste bei 45°-Winkeln (alle Bonferroni-post-hoc Einzelvergleiche werden signifikant; p-Werte < 0.05).

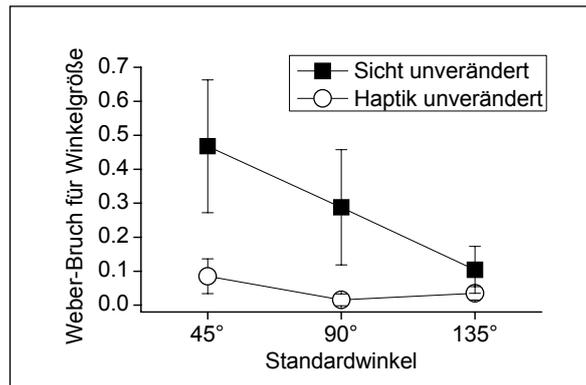


Abb. 7-23 Weber-Bruch in Abhängigkeit der Referenzmodalität für die drei Standardwinkel.

Vergleich mit den unimodalen Unterschiedsschwellen (Weber-Brüche). Um den Einfluss der Modalität zu ermitteln, wurden in einem nächsten Schritt die oben berichteten Ergebnisse mit den unimodalen Schwellwerten aus Abschnitt 7-2-3 verglichen. Wie in Abbildung 7-24 zu sehen ist, ist die Performanz geringer, wenn zusätzlich zu der zu diskriminierenden Modalität (Vergleichsmodalität) eine weitere Modalität dargeboten wird und dies umso mehr, wenn die zusätzlich dargebotene Modalität die visuelle ist.

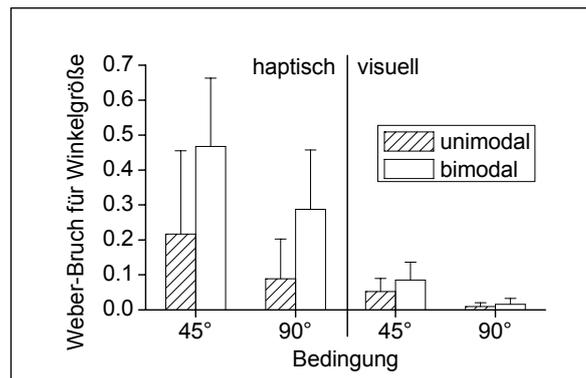


Abb. 7-24 Weber-Brüche für die Anzahl dargebotener Modalitäten sowie die jeweilige Vergleichsmodalität

Die Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA sind in Tabelle 7-25 dargestellt. Variationen des Standardwinkels (nur 45° und 90°) beeinflussen signifikant die Performanz: Weniger Unterschiede in der Winkelgröße sind nötig, wenn 90°-Winkel diskriminiert werden. Auch der Haupteffekt Modalität beeinflusst das Auflösungsvermögen statistisch reliabel: Werden Unterschiede in der haptischen Modalität diskriminiert, ist die Sensitivität geringer. Die statistisch signifikante Interaktion zwischen Modalität und Winkel kann auf eine Erhöhung der Schwelle bei 45°-Winkeln bei haptischer Diskriminierung zurückgeführt werden.

Tabelle 7-25 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA.

	F (df)	p	η^2
HE Standardwinkel (2)	58.15 (1,29)	< 0.05	0.667
HE Referenzmodalität (2)	57.51 (1,29)	< 0.05	0.665
WW Modalität x Winkel	14.55 (1,29)	< 0.05	0.334
HE Anzahl dargebotener Modalitäten (2)	14.21 (1,29)	< 0.05	0.329
WW Modalität x Anzahl	12.02 (1,29)	< 0.05	0.293
WW Winkel x Anzahl	2.02 (1,29)	0.166	0.065
WW Modalität x Winkel x Anzahl	0.25 (1,29)	0.620	0.009

Darüber hinaus zeigt sich ein signifikanter Unterschied bezüglich der Anzahl dargebotener Modalitäten: Das Auflösungsvermögen bei unimodaler Diskriminierung ist der bei bimodaler Darbietung überlegen. Auch die Interaktion zwischen Anzahl dargebotener Modalitäten und Referenzmodalität wird signifikant; der Effekt ist jedoch als eher mittelmäßig zu bezeichnen: Wie schon in Abbildung 7-24 deutlich wird, ist der Unterschied in der Anzahl dargebotener Modalitäten besonders deutlich, wenn haptisch diskriminiert wird.

7-2-4-3 Diskussion

Ist die haptische Modalität Referenz und wird die minimale intermodale Abweichung der visuellen Modalität von der haptischen Darstellung bestimmt, so lassen sich ca. 3% intermodale Abweichungen bei rechtwinkligen (oder stumpfen) Objektkanten detektieren, während für spitzwinklige Objektkanten 9% Unterschied nötig werden. Wird die visuelle Modalität unverändert dargeboten, während die haptische variiert, können Abweichungen erkannt werden, wenn die beiden Modalitäten voneinander um 10% (135°-Winkel), 30% (rechte Winkel) bzw. 50% (45°-Winkel) abweichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-26 zusammengefasst.

Tabelle 7-26 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock XII „Multimodale Wahrnehmung von Objektkanten – Grenzen der Integration“.

	Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
XII-1	Die Stärke der intermodalen Wahrnehmungsschwelle wird von der Referenzmodalität beeinflusst	bestätigt	$\eta^2=0.82$
XII-2	Die intermodale Diskrepanz wird vom Standardreiz modalitätsabhängig beeinflusst.	bestätigt	$\eta^2=0.71$
XII-3	Die bimodale Schwellenerhebung führt durch Hinzufügen einer Modalität, die unverändert bleibt, zu einer Erhöhung der unimodalen Schwelle	bestätigt	$\eta^2=0.33$
XII-4	Es zeigt sich ein Einfluss der Referenzmodalität in Abhängigkeit der Anzahl der dargebotenen Modalitäten	bestätigt	$\eta^2=0.30$

Einfluss der Winkelgröße. In Abhängigkeit der Winkelgröße variierte die Toleranz für intermodale Diskrepanzen (Hypothese XII-2): Abweichungen zwischen den Modalitäten wurden früher erkannt, wenn rechte Winkel im Vergleich zu spitzen Winkeln dargeboten wurden. Darüber hinaus war dieser Effekt, wie erwartet, modalitätsabhängig: Während sich bei zusätzlicher Darbietung der visuellen Modalität ein Trend, entsprechend dem bei haptischer Diskriminierung, abzeichnete, d.h. mit zunehmender Winkelgröße konnten Diskrepanzen zwischen beiden Modalitäten zunehmend besser erkannt werden, wurde bei haptischer Referenzmodalität der visuelle Oblique-Effekt nachgewiesen: Rechte Winkel wurden signifikant besser erkannt als oblique Winkel (45°, 135°). Diese Ergebnisse stehen sowohl in Übereinstimmung mit vorherigen Untersuchungen (s. Abschnitt 4-3 für haptische Wahrnehmung) als auch mit Befunden aus der Literatur (z.B. Wijntjes & Kappers, 2006; Voisin et al., 2002a; Snippe & Koenderink, 1994; Heeley & Timney, 1984; Orban et al., 1984; Appelle, 1971).

Einfluss der Referenzmodalität. Wie erwartet worden war (Hypothese XII-1), wirkt sich das Hinzufügen einer unverändert dargebotenen Modalität, insbesondere wenn es sich hierbei um die visuelle Modalität handelt, stärker auf die Performanz aus: Bedeutend größere Abweichungen zwischen den Winkelgrößen konnten nicht detektiert werden. Dieser Unter-

schied wird im direkten Vergleich mit den unimodalen Schwellen ebenfalls deutlich. Dabei lässt sich nicht nur eine generelle Unterlegenheit bei bimodaler (inkongruenter) Darbietung (s. Hypothese XII-3), sondern auch eine Verschlechterung haptischer im Gegensatz zu visueller Diskriminierung bestätigen (s. Hypothese XII-4).

Zusammengenommen bedeutet dies, dass die Wahrnehmung unimodaler Unterschiede, wie schon in Abschnitt 7-2-3 dargestellt, besonders bei visueller und bimodaler Wahrnehmung sehr exakt ist, während das Einführen von Diskrepanzen zu einer Erhöhung dieser Schwelle führt. Anders herum formuliert: Während die Genauigkeit der Darstellung innerhalb der visuellen oder haptischen Modalität sehr genau sein muss, sind größere Abweichungen zwischen den Modalitäten bei der Darstellungen von Objektkanten tolerierbar. Dabei ist jedoch relevant, in welcher der Modalitäten die Abweichung auftritt: Abweichungen der haptischen Modalität von einer visuellen Referenz werden nicht so leicht erkannt, wie umgekehrt.

7-2-5 Allgemeine Diskussion

In Abschnitt 4-3 wurde gezeigt, dass die Diskriminierung von Objektkanten mit dem Zeigefinger der Exploration mit einem Taststift nicht überlegen war: Ca. 20% Abweichung von einem spitzen (obliquen) Winkel und ca. 10% von einem rechten Winkel können dabei unterschieden werden. In Abschnitt 7-2-3 wurde die Diskriminierung von Winkeln bei haptischer, visueller oder kongruent bimodaler Exploration, über das, in Abschnitt 7-2-2 vorgestellte, HSI getestet: Die Ergebnisse aus Abschnitt 4-3 konnten auch für zwei weitere Positionierungen im Raum (A, B) bestätigt werden (s. Abbildung 7-25).

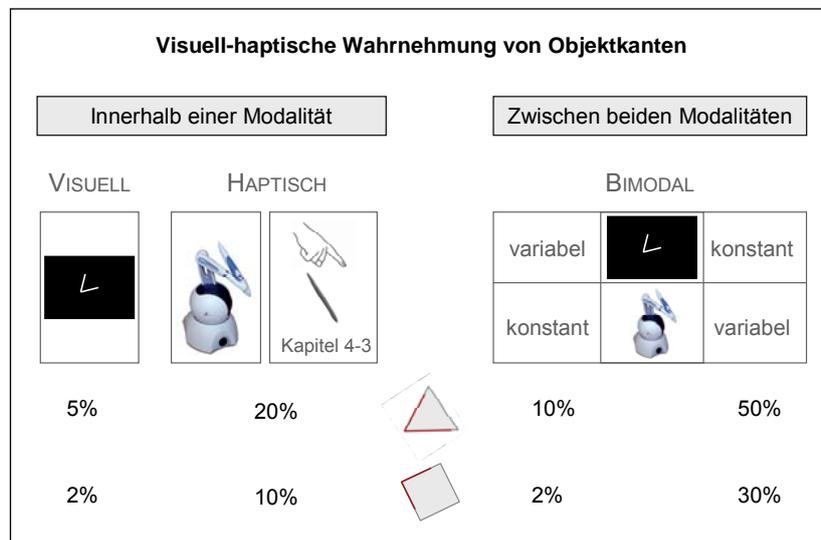


Abb. 7-25 Wahrnehmung von Objektkanten: Diskriminierungsvermögen innerhalb einer Modalität (visuell oder haptisch) bzw. für intermodale Abweichung bei der Darbietung von obliquen oder rechten Winkeln.

Darüber hinaus ist das visuelle System dem haptischen deutlich überlegen: Ungefähr 5% Abweichungen von einem obliquen Winkel und ca. 2% von einem rechten Winkel können diskriminiert werden. Diese Überlegenheit der visuellen über die haptische Modalität bei der Wahrnehmung von Winkelgrößen konnte durchgehend gezeigt werden (s. Abbildung 7-25). Zusätzlich konnte bestätigt werden, dass die bimodale Wahrnehmung vollständig von der visuellen Modalität dominiert wird.

Treten jedoch Abweichungen in der Darstellung zwischen visueller und haptischer Modalität auf, so können bei visueller Inkongruenz erst ab ca. 5% intermodale Unterschiede detektiert werden. Bei haptischer Inkongruenz sind zwischen 10-50% intermodale Abweichungen nötig, um detektiert werden zu können (s. Abbildung 7-25). Verglichen mit unimodaler Diskriminierung steigt bei zusätzlicher Darbietung einer zweiten unveränderten Modalität signifikant die Unterschiedsschwelle. Auch hier ließ sich wieder eine Überlegenheit der visuellen Wahrnehmung über die haptische zeigen.

Unabhängig von der Art der Aufgabe und der Modalität, in der die Winkelgrößen diskriminiert werden sollten, zeigte sich durchweg eine höhere Sensitivität für rechte Winkel und eine deutlich reduzierte Diskriminierungsleistung für spitze Winkel (s. Abbildung 7-25). Dieses Ergebnis reflektiert den bekannten Oblique-Effekt (s. z.B. Esock, 1980; Appelle, 1972).

7-3 Zusammenfassung

Für die Materialeigenschaft Objektnachgiebigkeit sowie für die geometrische Eigenschaft Objektkante wurden in Kapitel 7 drei Hauptfragen untersucht:

- 1) Führt bimodale gegenüber unimodaler Darbietung zu einem überlegenen menschlichen Auflösungsvermögen?
- 2) Dominiert eine (evtl. die visuelle) Modalität die bimodale Wahrnehmung?
- 3) Wo liegt die Grenze zwischen perzeptueller Kongruenz und detektierbarem intermodalem Konflikt?

Die Ergebnisse seien hier noch einmal zusammengefasst.

Ergebnisse zur Objektnachgiebigkeit.

Zu 1): In Abschnitt 7-1 konnte gezeigt werden, dass eine bimodale Darbietung nicht zu einer signifikant höheren Diskriminierungsleistung bei Objektnachgiebigkeit beiträgt und somit nicht besser ist als die Modalität mit dem höchsten Auflösungsvermögen ist: Bimodal dargebotene Nachgiebigkeit konnte genauso gut diskriminiert werden wie haptisch dargebotene (Weber-Bruch = 0.30).

Zu 2): Werden nachgiebige Objekte visuell und haptisch exploriert, erwies sich der Einfluss der visuellen Modalität als gering. Der Unterschied in der Diskriminierungsleistung zwischen visueller und haptischer Modalität war erwartet worden aufgrund der an der Wahrnehmung beteiligten Parameter: Bei haptischer Wahrnehmung werden Positions- und Kraftinformationen kombiniert, bei visueller Wahrnehmung tragen lediglich Informationen über die veränderte Fingerposition bei. Dies sollte in einer überlegenen unimodalen Wahrnehmung im visuellen System resultieren, wie auch bestätigt werden konnte, wenn die Probanden die wahrgenommene visuelle Eindringtiefe selbst so herstellen konnten, dass sie dem Standard entsprach (Weber-Bruch = 0.13). Darüber hinaus zeigte sich jedoch eine starke Beeinflussung der visuellen Diskriminierungsleistung von der Lenkung der Aufmerksamkeit: Aktiver und schneller Vergleich beider Modalitäten miteinander erleichterte die visuelle Wahrnehmung, während bei fehlender Möglichkeit, eine Modalität direkt zu verändern, hohe Abweichungen unbemerkt blieben. Diese verringerte visuelle Reliabilität führte dazu, dass Probanden am stärksten auf die haptische Modalität achteten.

Zu 3): Die Bestimmung der Grenzen bimodaler Wahrnehmung zeigt sich abhängig von der Lenkung der Aufmerksamkeit: Die Detektion von Abweichungen zwischen den Modalitäten bei einer bimodalen Darstellung ist deutlich erschwert, wenn der Vergleich mit einer perfekten (kongruenten) Umsetzung nicht möglich ist (Weber-Bruch = 0.85). Besteht jedoch die Möglichkeit, mit einer perfekten, also kongruenten, Darstellung zu vergleichen, werden intermodale Inkongruenzen früher bemerkt (Weber-Bruch = 0.55). Dabei zeigte sich die intermodale Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz nicht unabhängig von der Referenzmodalität: Größere Konflikte wurden toleriert, wenn die haptische Modalität von der visuellen abwich.

Ergebnisse zu den Objektkanten.

Zu 1): In Abschnitt 7-2 wurde erneut nachgewiesen, dass eine bimodale Darbietung nicht zu einer signifikant höheren Diskriminierungsleistung führt. Bimodal dargebotene Objektkanten können genauso gut diskriminiert werden, wie solche, die ausschließlich visuell dargeboten werden (Weber-Bruch = 0.02-0.05). Es zeigte sich zwar eine leichte Tendenz zu einer verlässlicheren Wahrnehmung bei bimodaler Darbietung, der Unterschied wurde jedoch nicht signifikant.

Zu 2): Im Allgemeinen dominiert die visuelle Modalität die Gesamtwahrnehmung weitgehend.

Zu 3): Die intermodale Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz ist, wie auch die das Auflösungsvermögen bei uni- wie auch bimodaler Reizdarbietung sehr stark von der Winkelgröße beeinflusst. Sollen die Probanden nun, ausgehend von der visuellen Modalität, Abweichungen in der haptischen Darstellungen der Objektkante detektieren, werden geringe Abweichungen detektiert bei rechtwinkligen Objektkanten (Weber-Bruch = 0.30), während 50% Unterschiede in der visuellen und haptischen Winkelgröße bei spitzen Objektkanten nötig sind, um diskriminiert werden zu können. Auch bei Objektkanten zeigt sich der Einfluss der Referenzmodalität: Die Grenze für die Wahrnehmung perzeptueller Inkongruenz ist bedeutend geringer, wenn visuelle Abweichungen von der haptischen Darstellung detektiert werden sollen.

Sowohl für Objektnachgiebigkeit als auch für -kanten konnte ein der unimodalen Darstellung überlegenes Auflösungsvermögen im bimodalen Fall nicht direkt nachgewiesen werden. Ist dann überhaupt eine bimodale Rückmeldung erforderlich? Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass sich redundante, multimodale Rückmeldung innerhalb eines TPTA-Systems positiv auf die Aufgabenleistung sowie das Präsenzerleben auswirkt (vgl. Hecht et al., 2006; Stanney, Mourant & Kennedy, 1998; Lombard & Ditton, 1997; Sheridan, 1992a; Steuer, 1992).

In diesen Studien wird jedoch stets davon ausgegangen, dass die multimodale Rückmeldung intermodal kongruent erfolgt. In diesem Kapitel wurde jedoch gezeigt, dass durchaus große intermodale Abweichungen kompensiert werden können. Oberhalb der Grenze für die Wahrnehmbarkeit intermodaler Konflikte sollte sich die abnehmende Qualität der Darstellung negativ auf Präsenzerleben und Aufgabenleistung auswirken, während sich demzufolge perzeptuell kongruente Darstellung, da die intermodalen Unterschiede nicht detektiert werden, weder auf das Präsenzerleben noch die Aufgabenleistung auswirken sollte. Dieser Fragestellung wird im nächsten Kapitel nachgegangen.

8 TEIL IV EVALUATION: EINFLUSS BIMODALER INKONGRUENZEN AUF DIE WAHRNEHMUNG

“When sensorial redundancy is provided to users it is essential to consider the design of the integration of these multiple sources of feedback.”

(Stanney et al., 1998, p. 338)

“[...] perceptual fidelity and other sensory factors affects how much presence is reported. The naturalness of the interactions with the VE and how closely these interactions mimic real-world experience also affect how much presence is reported.”

(Witmer & Singer, 1998, p.239)

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Grenzen visuell-haptischer Integration ermittelt wurden, gilt es nun, in einem zweiten Schritt ihren Einfluss auf die Wahrnehmung zu prüfen und demzufolge zu evaluieren, ob sich intermodale Inkongruenzen unterhalb sowie oberhalb der Schwelle für ihre Wahrnehmung auf die Performanz und das Präsenzerleben auswirken (s. Kapitel 8).

Gerade im Kontext der Arbeit mit TPTA-Systemen ist grundsätzlich das Präsenzerleben des Benutzers bei gleichzeitig hoher Systemtransparenz ein wichtiges Ziel der Gestaltung. Es wird also auf technologischer Seite angestrebt, ein System möglichst wirklichkeitsnah zu gestalten, so dass Sensorik und Aktuatorik die Wirklichkeit möglichst genau abbilden (vgl. Slater & Wilbur, 1997); gleichzeitig soll das System transparent sein, so dass sich die Interaktion innerhalb des Systems sowie die Kommunikation zwischen Operator und Teleoperator (oder virtueller Umgebung) von einer realen Interaktion nicht unterscheidet (vgl. Hirche, 2005).

Daneben ist es auf psychologischer Seite relevant, dem Menschen das Gefühl zu vermitteln, dass er sich in der entfernten oder virtuellen Umgebung “tatsächlich“ befindet, also ein möglichst authentisches Präsenzerleben herzustellen (z.B. Nash et al., 2000; Draper et al., 1998; Sheridan, 1992b). Als ein wichtiger, das Präsenzerleben deutlich mitbestimmender, Faktor trägt die Beurteilung der Qualität der Schnittstelle bei (z.B. Schubert et al., 2001; Witmer & Singer, 1998; Lombard & Ditton, 1997).

Eine dergestalt „perfekte“ Darstellung in TPTA-Systemen ist jedoch technologisch nur mit ungeheurem rechnerischen Aufwand zu leisten, und – und das ist das eigentlich Entscheidende – doch für den Menschen oft nicht nötig. Denn auch wenn dieser immense „Input“ an Informationen reduziert wird, der für eine solch „wahrheitsgetreue“ Darstellung elektronisch umgewandelt und an den Menschen zurückgemeldet werden muss, das bedeutet, die zu übertragenden Informationen komprimiert werden, so muss dies nicht notwendigerweise gleichzeitig in einem Qualitätsverlust in den einzelnen Wahrnehmungsprozessen resultieren. Bei der Auswahl dessen, was übermittelt werden muss, und worauf verzichtet werden kann, gilt es, auf die Ergebnisse in den vorigen Kapiteln zurückzugreifen.

Um zu verhindern, dass durch die Reduktion der übermittelten Informationen zum einen und durch kommunikationsbedingte Einschränkungen in der Informationsübertragung zum anderen Aspekte nicht übertragen werden, die für die Wahrnehmung entscheidend sind, können

Daten wahrnehmungsbasiert komprimiert kodiert werden (z.B. Kuschel et al., 2006). Diese Kompressionsverfahren reduzieren die Datenmenge, indem sie die Beschränkungen der menschlichen Informationsverarbeitung ausnutzen, die sich insbesondere auf die Unterscheidbarkeit von Reizparametern (Weber-Brüche) beziehen (z.B. Hirche et al., 2005a, b). In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, dass neben der intramodalen (haptischen) Wahrnehmung, zu der bereits einige Ansätze zur Datenreduktion existieren, auch die intermodale visuell-haptische Wahrnehmung aufgrund der Kompensierbarkeit intermodaler Konflikte im Bereich perzeptueller Kongruenz sich für dieses Verfahren anbietet, da auch sie in ihrer Auflösungsgenauigkeit begrenzt ist (s. insbesondere Kapitel 7).

Bleibt zuletzt die Frage, ob ein „perfektes“ Präsenzerleben auch die Performanz des Benutzers bei der Arbeit mit einem TPTA-System oder innerhalb einer virtuellen Umgebung von entscheidender Bedeutung für die Gestaltung eines TPTA ist. Einige Forschern gehen davon aus, dass sich „perfektes“ Präsenzerleben und erfolgreiche Performanz bedingen (vgl. Draper et al., 1998; Barfield et al., 1995; Steuer, 1992; Sheridan, 1992b), allerdings lässt sich diese These nicht verallgemeinern oder immer bestätigen (s. dazu Pongrac, in Vorbereitung).

Im folgenden Kapitel soll daher untersucht werden, inwiefern sich die bimodal kongruente, perzeptuell kongruente und perzeptuell intermodal diskrepante Darstellung von Informationen v.a. auf das Präsenzerleben auswirkt.

Dies soll am Beispiel der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit (s. Kapitel 8-1) sowie von Objektkanten (s. Kapitel 8-2) geprüft werden (s. Abbildung 8-1), so dass schließlich Ergebnisse vorliegen, anhand derer entschieden werden kann, welcher Aufwand in Bezug auf die technische Perfektion leistungsfähiger TPTA-Systeme wirklich nötig ist, um eine bestmögliche Performanz bei möglichst geringem, übertragungsbedingtem Datenverlust zu erzielen³².

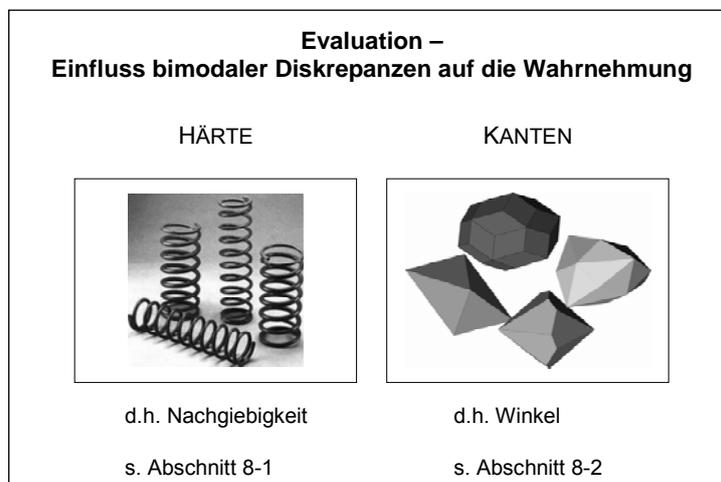


Abb. 8-1 Für eine relevante Material- sowie Geometrie-eigenschaft, deren intermodale Wahrnehmungsschwellen in den in den Abschnitten 7-1 und 7-2 untersucht wurden, soll u.a. geprüft werden, inwiefern Diskrepanzen in der Darstellung das Präsenzerleben beeinflusst.

³² Alternativ kann eine gezielte Umsetzung einer Inkongruenz zwischen visueller und haptischer Rückmeldung beispielsweise auch bei der Rehabilitation eingesetzt werden (vgl. z.B. Brewer, Fagan, Klatzky & Matsuoka, 2005).

8-1 Bimodale Inkongruenzen bei der Darstellung von Objektnachgiebigkeit

In Kapitel 7-1 wurde ermittelt, wie stark die visuelle und die haptische Darstellung von Objektnachgiebigkeit voneinander abweichen darf, ehe intermodale Diskrepanzen in mehr als 50% der Fälle detektiert werden können. Die Toleranzen für intermodale Abweichungen zeigten sich dabei abhängig von der Art der Aufgabe bzw. der Verteilung der Aufmerksamkeit auf beide Modalitäten zugleich oder auf die allgemeine Unterscheidung kongruenter von inkongruenter Darstellung. Auch bei direktem Herstellen einer perzeptuell kongruenten Darstellung verändert sich die intermodale Wahrnehmungsschwelle. Die Weber-Brüche für intermodale Abweichungen variierten zwischen wenigstens 30-85% (s. Abschnitt 7-1-6). Darüber hinaus war die Höhe des detektierbaren Unterschieds abhängig von der Modalität: Abweichungen in der haptischen von der visuellen Darstellung wurden weniger toleriert. Unklar ist jedoch, inwiefern Abweichungen in der visuell-haptischen Darstellung von Objektnachgiebigkeit sich auf die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit auswirken.

Erste Ergebnisse zeigten, dass selbst perzeptuell kongruente Informationen die Wahrnehmung beeinflussen können (vgl. Soto-Faraco et al., 2002). Es wird daher erwartet, dass die Einschätzung bimodaler Nachgiebigkeit variiert in Abhängigkeit der Kongruenz ihrer Darstellung. Besonders mit zunehmender Diskrepanz zwischen den Modalitäten oberhalb der Detektionsschwelle, sollte sich die Trennbarkeit der einzelnen Modalitäten verbessern und die Verzerrung der Beurteilung abnehmen (vgl. Marks, 2004).

Hypothese XIII-1: Die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit wird vom Grad der Diskrepanz beeinflusst. Auch unterhalb der Wahrnehmungsschwelle zeigt sich eine Verzerrung der bimodalen Wahrnehmung bei inkongruenter Darstellung. Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle führt zunehmende Inkongruenz zu einer erhöhten Trennbarkeit der Wahrnehmung der einzelnen Modalitäten und somit zu einer Abnahme der Verzerrung.

Größere Abweichungen zwischen den Modalitäten wurden bei visueller Referenz toleriert, wie in Abschnitt 7-1-5 (vgl. auch Abschnitt 7-2-4) gezeigt werden konnte. Da die Referenzmodalität einen Einfluss auf die Detektion der Wahrnehmungsgrenzen hat, wird erwartet, dass sich die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit in Abhängigkeit der tatsächlichen Diskrepanz sowie der Referenzmodalität ändert. Dabei sollte die visuelle Modalität besonders stark zu einer Verzerrung der Nachgiebigkeitsbeurteilung beitragen, wenn sie selbst variiert wird, und die haptische Modalität unverändert bleibt.

Hypothese XIII-2: Die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit wird von der Referenzmodalität beeinflusst.

Zusätzlich wird ein Einfluss der Diskrepanz auf das Präsenzerleben erwartet: In Kapitel 1 war bereits beschrieben worden, dass die Qualität der Schnittstelle bedeutend zum Präsenzerleben beiträgt (z.B. IJsselstein et al., 2000; Mantovani & Riva, 1999; Witmer & Singer, 1998; Barfield et al., 1995; Sheridan, 1992b). Eine zunehmend inkongruente Darstellung stellt damit eine eingeschränkte Qualität der Darstellung dar und sollte sich v.a. oberhalb der Wahrnehmungsgrenze dementsprechend negativ auf das Präsenzerleben auswirken.

Hypothese XIII-3: Mit zunehmender Diskrepanz oberhalb der Wahrnehmungsschwelle nimmt das Präsenzerleben ab.

Zusätzlich wird eine Beeinflussung des Präsenzerlebens in Abhängigkeit der Referenzmodalität erwartet. Wie schon gezeigt werden konnte, dass die Referenzmodalität die intermodale Toleranzgrenze beeinflusst, wird auch erwartet, dass das Präsenzerleben unterschiedlich stark beeinträchtigt wird, abhängig davon, ob die visuelle oder haptische Modalität unverändert bleibt.

Hypothese XII-4: Das Präsenzerleben wird in Abhängigkeit der Referenzmodalität unterschiedlich stark beeinträchtigt.

8-1-1 Methode

Stimuli. Würfel mit einer Kantenlänge von 80 mm und einer Standardnachgiebigkeit von 0.851 mm/N wurden visuell und haptisch über das in Abschnitt 7-1-2 vorgestellte HSI dargestellt. Feste intermodale Diskrepanzen wurden ausgehend von dieser Standardnachgiebigkeit definiert, die entweder in der visuellen oder haptischen Modalität jeweils unverändert blieb (Referenzmodalität) und in der Vergleichsmodalität um +30, 60, 80, 120, 160, 200, 240 oder 280% abwich, d.h. die abweichende Modalität erscheint stärker nachgiebig. Diese intermodalen Inkongruenzen wurden nach den Ergebnissen von Abschnitt 7-1-5 gewählt.

Versuchsdesign. Aufgrund der Fragestellung sind die zu manipulierenden Faktoren *Diskrepanz* (8 Stufen sowie kongruente Darstellung) und *Referenzmodalität* (visuell, haptisch). Alle 18 Reizbedingungen wurden innerhalb eines Blocks randomisiert dargeboten; insgesamt bearbeiteten die Probanden 8 Blöcke (d.h. jede Reizbedingung wurde achtmal wiederholt). Als abhängige Variablen wurden die Beurteilung der Nachgiebigkeit über Magnitude Estimation (vgl. Abschnitt 3-3) erfasst: Der Proband skalierte die wahrgenommene Nachgiebigkeit zwischen „1“ (gering nachgiebig) und „10“ (hoch nachgiebig); Dezimalzahlen und Brüche waren erlaubt.

Ein möglicher Einfluss auf die Antwortzeit wird zusätzlich überprüft.

Ebenfalls beurteilte der Proband auf einer 7-stufigen Ratingskala jede Reizdarbietung hinsichtlich seines Präsenzerlebens über ein Item aus dem Präsenzfragebogen von Scheucherpflug (wie auch in Abschnitt 5-2-3): „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit ihrer Umgebung?“, welches auf einer 7-stufigen Skala („1“ sehr gering, „7“ sehr hoch) beantwortet wurde.

Reaktionszeit	LED	Hauptexperiment
Joystick nach oben	<input type="checkbox"/>	Sicht als Referenz
Joystick nach rechts	<input type="checkbox"/>	
Joystick nach unten	<input type="checkbox"/>	Haptik als Referenz

Abb. 8-2 Bedeutung der Lichtsignale der drei LED-Anzeigen (s. Abbildung 7-5). Das Aufleuchten der jeweiligen LED-Anzeigen bedeutete im Reaktionszeittest, in welche Richtung der Joystick bewegt werden sollte, und im Hauptexperiment, welche Modalität unverändert blieb.

Den Probanden wurde zur Kontrolle der immersiven Tendenz der Immersionsfragebogen (s. Anhang D) sowie der, um eine Frage erweiterte, demographische Fragebogen vorgelegt (s. Abbildung 7-14 Gruppe A).

Versuchsdurchführung. Das HSI wurde um die bereits in Abschnitt 7-1-4 beschriebene LED-Anzeige für die Baseline-Messung der Reaktionszeit erweitert.

Bevor die Hauptuntersuchung begann, wurden zwei Baseline-Messungen vorgenommen: Die erste Messung bestand aus drei modalitätsabhängigen Blöcken, innerhalb derer jede der 9 definierten nachgiebigen Würfel dreimal randomisiert präsentiert und die Beurteilung der Stärke der Nachgiebigkeit über Magnitude Estimation protokolliert wurde. Im Anschluss daran erfolgte die zweite Baseline-Messung zur Antwortzeit, bei der die Probanden instruiert wurden, so schnell wie möglich den Joystick in die über das Lichtsignal angezeigte Richtung zu bewegen (s. dazu Abbildung 8-2). Nach (richtiger) Betätigung des Joysticks wurde mit einer variablen Zeitverzögerung unter 10 s erneut zufällig ein Lichtsignal gegeben.

Vor dem Hauptexperiment wurde dem Probanden der kongruente Reiz als Testreiz dargeboten, um zugleich auch die Abfolge der Antworten im Anschluss an eine Reizpräsentation zu erläutern. Die Probanden wurden gebeten, auf durch die LED signalisierte Referenzmodalität zu achten (s. Abbildung 8-2) und zu überprüfen, ob sich diese von der Vergleichsmodalität unterschied. Im Anschluss daran gab der Proband möglichst akkurat und möglichst schnell über den Joystick ein, ob er einen Unterschied gespürt hatte oder nicht. Die Reaktionszeit wurde zwischen Trialende bis zur ersten Betätigung des Joysticks erfasst. Je nach eingegebener Antwort beurteilte der Proband die bimodale Wahrnehmung (kein Unterschied gespürt) oder die beiden Einzelwahrnehmungen (Unterschied gespürt) mittels Magnitude Estimation. Zuletzt beurteilte der Proband sein Präsenzempfinden. Ein Trial (sowohl bei der Baseline-Messung als auch im Hauptexperiment) betrug 4 Sekunden. Eine neue Reizpräsentation startete durch erneute Betätigung des Joysticks.

Statistische Analyse. Vor Hypothesenprüfung wurden alle individuellen Beurteilungen der Nachgiebigkeit in Abhängigkeit pro Proband normiert, so dass ihre geringste Ausprägung 1% und die höchste 100% entspricht (s. Abschnitt 5-1-3). Die wiederholten Messwerte wurden für die (an der Baseline relativierten) individuellen Antwortzeiten sowie Präsenzempfinden und Magnitude Estimation (ME) gemittelt.

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss der PersonenvARIABLE Immersive Tendenz auf die Daten geprüft (s. Abschnitt 8-1-3-1). Zusätzlich wurden die relativen Häufigkeiten, die Diskrepanzen korrekt zu erkennen, berechnet. Die Wahrnehmungsschwelle wird über die Wahrscheinlichkeit, korrekt zu detektieren, nach Formel (7) als Index der Detektabilität bestimmt (s. Abschnitt 3-2). Als Schwellwert wurde die Diskrepanz gewählt, bei der die mittlere Sensitivität d' bei $d' > 1$ lag (nach Macmillan & Creelman, 2001; Gescheider, 1985).

Im Anschluss daran wurde mittels einer ANOVA untersucht, ob sich die Baseline-Einschätzung der einzelnen Modalitäten (visuell, visuell-haptisch, haptisch) in Abhängigkeit der Abweichung von der Standardnachgiebigkeit (9 Stufen) unterscheidet (s. Abschnitt 8-1-3-3).

In Abhängigkeit der in Abschnitt 8-1-3-2 berichteten Wahrnehmungsschwelle wurden die ME-Werte an der Baseline relativiert: Werte unterhalb der Schwelle wurden gegen die bimodalen Baseline, Werte oberhalb der Schwelle getrennt nach unimodaler Einschätzung sowie in Abhängigkeit der Referenzmodalität gegen die jeweiligen unimodalen Baseline relativiert. Die Fragestellungen wurden in Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle getestet; der Einfluss von *Referenzmodalität* und *Diskrepanz* unterhalb der Schwelle wurde mit einer zweifaktoriellen ANOVA für die bimodale Beurteilung geprüft, während ein zusätzlicher Einfluss der *Beurteilung* mit einer dreifaktoriellen ANOVA für Diskrepanzen oberhalb der Schwelle getestet wurde. Einzeleffekte wurden mit getrennten Analysen geprüft. Zuletzt wurde getestet, inwiefern die Beurteilung des Standardreizes vom Kontext der Reizbedingungen (kongruent,

perzeptuell kongruent, diskrepante Darstellung innerhalb der Referenzmodalität) beeinflusst wird.

Die individuellen Beurteilungen des Präsenzerlebens in Abhängigkeit der Diskrepanz sowie der Referenzmodalität wurden am kongruenten Reiz relativiert. Demzufolge bedeutet eine auftretende Variation eine zusätzliche Veränderung relativ zum kongruenten Reiz. Der Einfluss der intermodalen *Diskrepanz* sowie der *Referenzmodalität* wird über eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung geprüft; bei signifikantem Einfluss der beiden Faktoren werden die Hypothesen bezüglich der Detektionsschwelle über zwei getrennte Analysen getestet.

Zuletzt wird über eine ANOVA getestet, ob sich die individuelle Antwortzeit (d.h. relativiert an der Baseline-Messung) im Vergleich zur kongruenten Darstellung mit zunehmender Diskrepanz bzw. in Abhängigkeit der Referenzmodalität ändert.

Alle F-Statistiken werden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 1% festgesetzt.

8-1-2 Experimentalblock XIII – Evaluation inkongruenter Darstellung von Nachgiebigkeit

8-1-2-1 Stichprobe und Personenvariablen

Stichprobe. Am Experimentalblock XIII „Evaluation – Einfluss bimodaler Inkongruenzen bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit“ nahmen 18 Studenten der Technischen Universität und der Ludwigs-Maximilians-Universität München teil. 4 Personen mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, da sie Schwierigkeiten mit den Instruktionen hatten. Alle verbleibenden 14 Personen (6 Männer, 8 Frauen) waren Rechtshänder; ihr durchschnittliches Alter betrug 23 Jahre. Die Probanden waren normalsichtig oder benutzten ihre Sehkorrektur. 5 Probanden hatten bereits an psychophysischen Experimenten teilgenommen.

Personenvariablen. Die Probanden unterschieden sich weder in ihrer emotionalen Involvementstendenz (MW = 28.4, sd = 4.3) noch in ihrem Involvierungsgrad (MW = 19.4, sd = 4.9) von der Eichstichprobe (s. Scheucherpflug, 2001); die Stichprobe kann somit als repräsentabel angesehen werden. Weder die Einschätzungen der wahrgenommenen Nachgiebigkeit noch die Ratings der Präsenzfrage oder die Reaktionszeit korrelierten signifikant mit einem der beiden Faktoren.

Die Probanden gaben an, dass ihnen die Aufgabe leichter fiel, wenn die haptische Modalität (n=7) oder die visuelle Modalität (n=2) unverändert blieb. Die Antwortkategorie „Keine Erleichterung durch eine der beiden Modalitäten“ wählten 5 Probanden.

Wahrnehmungsschwelle. Aus den relativen Häufigkeiten wird in Abhängigkeit der Diskrepanz der Index der Detektabilität bestimmt. In Abbildung 8-3 wurden die Sensitivitätswerte d' über alle Probanden gemittelt dargestellt: Im Mittel nimmt die Sensitivität (d') mit zunehmender intermodaler Diskrepanz zu. Für Diskrepanzen von mehr als 80% liegt der d' -Wert oberhalb von 1.0. Die Wahrnehmungsschwelle liegt unter Diskrepanzen von 120%.

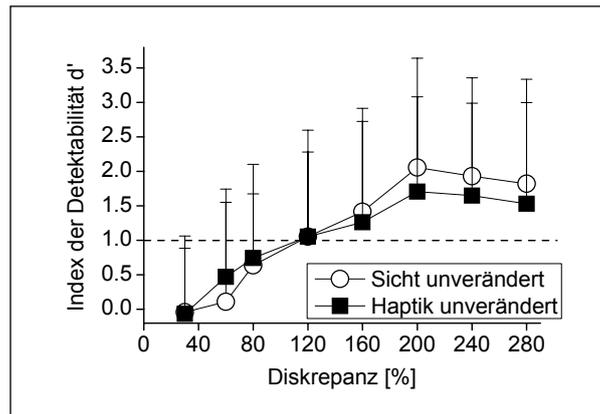


Abb. 8-3 Index der Detektabilität (d') in Abhängigkeit visuell-haptischer Diskrepanz. Für mehr als 80% visuell-haptische Diskrepanz wird $d'=1$ überschritten.

8-1-2-2 Beeinflussung wahrgenommener Nachgiebigkeit

Baseline. In Abbildung 8-4 sind die Ergebnisse der Baseline-Messung abgetragen: Probanden beurteilten für jede Modalität getrennt, sowie für beide Modalitäten gemeinsam, die wahrgenommene Nachgiebigkeit. Mit zunehmender Nachgiebigkeit, d.h. mit zunehmender Abweichung von dem definierten Standardreiz, nimmt die Beurteilung der Stärke wahrgenommener Nachgiebigkeit zu. Zwischen den Modalitäten zeichnet sich kein Unterschied in der Wahrnehmung ab.

Eine 3x9 ANOVA mit Messwiederholung bestätigte, dass die meiste Varianz von Variationen der Standardnachgiebigkeit abhängt (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.2, 15.5)=30.13$, $p<0.01$; $\eta^2=0.699$): Mit zunehmender Nachgiebigkeit nimmt die eingeschätzte Ausprägungsstärke der Nachgiebigkeit linear zu ($F(1, 13)=33.25$, $p<0.01$; $\eta^2=0.719$). Weder der Haupteffekt Modalität ($F(2, 26)=0.93$, $p=0.409$) noch die Interaktion mit der Standardnachgiebigkeit (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(4.6, 60.4)=1.29$, $p=0.281$) wurden statistisch signifikant.

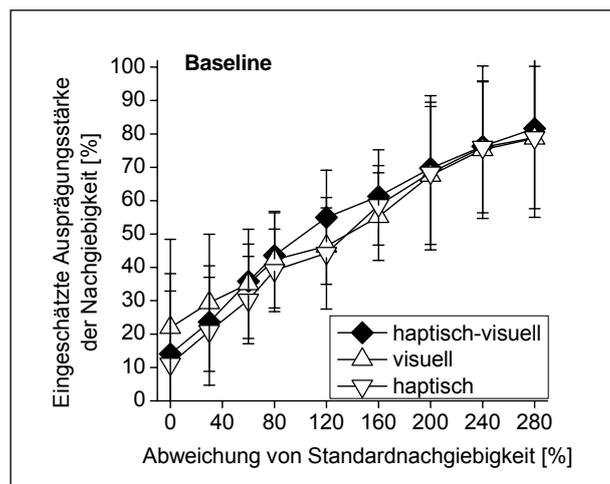


Abb. 8-4 Baseline für Einschätzungen der Ausprägungsstärke der wahrgenommenen Nachgiebigkeit für die im Hauptexperiment verwendeten Diskrepanzen in den einzelnen Modalitäten.

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. In Abbildung 8-5 sind die Beurteilung der Ausprägungsstärke bimodaler Nachgiebigkeit (relativiert an der bimodalen Einschätzung während der Baseline-Messung) dargestellt: Die Nachgiebigkeitsbeurteilung relativ zur Baseline ist reduziert; dies trifft jedoch auch auf die Beurteilung des kongruenten Reizes zu. Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle scheint die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit von der intermodalen Diskrepanz unbeeinflusst. Weder der Haupteffekt Diskrepanz ($F(2,10)=1.99$, $p=0.187$), noch die Variation der Referenzmodalität ($F(1,5)=1.74$, $p=0.245$) oder die Interaktion ($F(2,10)=0.51$, $p=0.614$) werden statistisch signifikant.

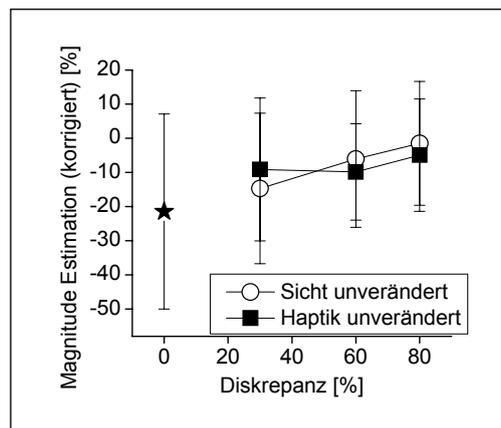


Abb. 8-5 Bimodale ME-Werte für die Einschätzung der Ausprägungsstärke der Nachgiebigkeit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wurden an der jeweiligen bimodalen Baseline relativiert und in Abhängigkeit der Referenzmodalität dargestellt.

Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle. In Abbildung 8-6 sind die gegen die jeweilige unimodale Baseline relativierten Einschätzungen der Nachgiebigkeit des Standardreizes abgetragen: Alle Darstellungen werden erneut als weniger nachgiebig im Vergleich zur Baseline bewertet. Am stärksten weicht jedoch die Beurteilung bei visueller Variation und haptisch gleicher Standardnachgiebigkeit (haptische Referenz) von der Baseline-Beurteilung ab. Darüber hinaus scheint die unimodale Beurteilung der Referenzmodalität unbeeinflusst von Variationen der anderen Modalität: D.h. bei visuell unveränderter Darstellung ist deren (visuelle) Beurteilung über die Diskrepanzen der haptischen Modalität nahezu gleich. Dem entgegen verändert sich, relativ zur Baseline die Beurteilung der Vergleichsmodalität: D.h. bei visuell unveränderter Darstellung verändert sich die (haptische) Beurteilung der tatsächlich variierenden haptischen Darstellung mit zunehmender Diskrepanz. Dieser Effekt ist besonders deutlich, wenn die haptische Modalität unverändert bleibt.

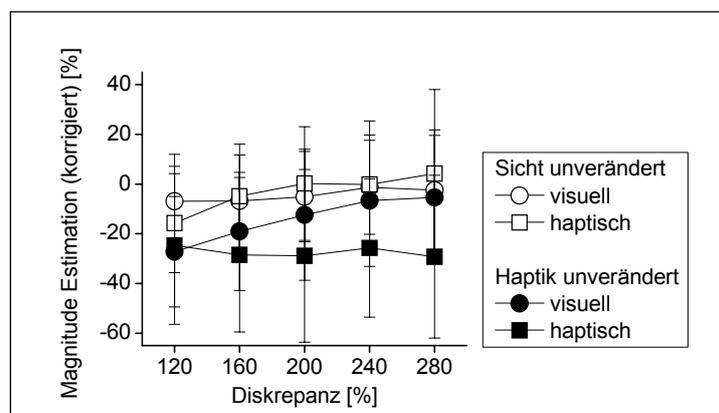


Abb. 8-6 Unimodale ME-Werte oberhalb der Wahrnehmungsschwelle wurden an den jeweiligen unimodalen Baseline relativiert und in Abhängigkeit der unverändert gehaltenen Modalität dargestellt.

In Tabelle 8-1 sind die Ergebnisse der ANOVA zusammengestellt. Variationen bezüglich der Referenzmodalität beeinflussen die Beurteilung der Stärke der Nachgiebigkeit am stärksten: Die Beurteilung der Nachgiebigkeit bei visueller Referenzmodalität weicht weniger stark von der Baseline ab (d.h. liegt näher an Null; s. Abbildung 8-6). Auch Variationen in der Diskrepanz beeinflussen die Bewertungen: Mit zunehmender Diskrepanz nimmt die Beurteilung der Nachgiebigkeit linear zu ($F(1,13)=13.76$, $p<0.01$; $\eta^2=0.514$), d.h. nähert sich der Bewertung der Baseline an.

Tabelle 8-1 Ergebnisse der dreifaktoriellen univariaten ANOVA. Mit (*) gekennzeichnete Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	F(df)	p	η^2
HE Referenzmodalität (2)	30.28 (1,13)	< 0.01	0.700
HE Diskrepanz (6)	8.57 (2,3,29.8)*	< 0.01	0.397
HE Beurteilung (2)	2.43 (1,13)	0.143	0.158
WW Referenzmodalität x Diskrepanz	0.44 (4,52)	0.779	0.033
HE Beurteilung x Referenzmodalität	0.46 (1,13)	0.510	0.034
WW Beurteilung x Diskrepanz	0.715 (4,52)	0.589	0.052
3 fache Wechselwirkung	4.76 (2,0,25.7)*	0.018	0.268

Die 3 fache Wechselwirkung wird nicht auf dem 1%-Signifikanzniveau, jedoch auf dem 5%-Signifikanzniveau, signifikant (mittlere Effektstärke). Es wurden dennoch, um den Einfluss getrennt für Referenz- und Vergleichsmodalität beurteilen zu können, zwei getrennte ANOVAs für die Faktoren Beurteilung sowie Diskrepanz berechnet.

Wird die Referenzmodalität bewertet, so unterscheidet sich die Stärke der Nachgiebigkeitsbeurteilung in Abhängigkeit der beurteilten Modalität ($F(1,13)=17.96$, $p<0.01$; $\eta^2=0.580$): Die visuelle Einschätzung entspricht eher der Baseline-Messung (d.h. liegt näher an Null). Weder Variationen der Diskrepanz (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.6,33.5)=1.32$, $p=0.285$) noch die Interaktion (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.5,32.6)=1.34$, $p=0.279$) werden statistisch signifikant.

Beurteilen die Probanden die in Abhängigkeit der Diskrepanz variierende Modalität, beeinflusst die beurteilte Modalität die Stärke der wahrgenommenen Nachgiebigkeit nicht ($F(1,13)=6.20$, $p=0.03$; $\eta^2=0.323$). Der Einfluss der Diskrepanz wird statistisch signifikant (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.9,24.2)=7.34$, $p<0.01$; $\eta^2=0.361$): Mit zunehmender Diskrepanz nimmt die Beurteilung der Nachgiebigkeit linear zu ($F(1,13)=9.94$, $p<0.01$; $\eta^2=0.433$) und liegt nahe an der Baseline. Die Interaktion ($F(4,52)=0.351$, $p=0.842$) erreicht nicht statistische Signifikanz.

Kongruenter Stimulus. Zuletzt soll geklärt werden, inwieweit der Kontext um den Standardreiz seine Beurteilung beeinflusst hat. In Abbildung 8-7 sind die bimodalen und unimodalen Einschätzungen des kongruenten Reizes in allen möglichen Zusammensetzungen abgetragen: Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wurde der tatsächlich (physikalisch) kongruente sowie der lediglich perzeptuell kongruente Standardreiz bimodal eingeschätzt; oberhalb der Schwelle erfolgte diese Einschätzung entweder visuell bei visueller Referenzmodalität oder haptisch bei haptischer Referenz.

Es wurde bereits gezeigt, dass sich in der Beurteilung oberhalb der Wahrnehmungsschwelle eine Abhängigkeit der Modalität zeigt. Wie in Abbildung 8-7 ersichtlich wird, weicht neben der Beurteilung der haptischen Darstellung bei visueller Variation auch die Einschätzung der Nachgiebigkeit des tatsächlich kongruenten Reizes von der Baseline ab.

Der Haupteffekt Bedingung (4 Stufen) wurde statistisch signifikant ($F(3,39)=6.63$, $p<0.01$; $\eta^2=0.338$). Bonferroni-post-hoc Einzelvergleiche zeigen, dass sich lediglich die beiden Beurteilungen oberhalb der Schwelle signifikant voneinander unterscheiden ($p<0.01$). Kein anderer Vergleich wird statistisch signifikant.

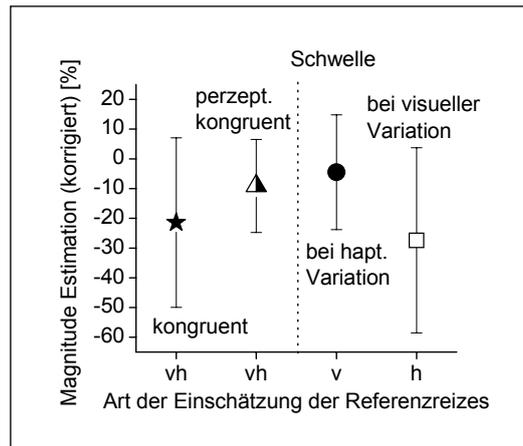


Abb. 8-7 Einfluss der Beurteilung der Standardnachgiebigkeit des kongruenten Reizes in Abhängigkeit der Reizbedingungen: Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wurde er bimodal eingeschätzt; oberhalb der Wahrnehmungsschwelle unimodal in Abhängigkeit der Referenzmodalität.

8-1-2-3 Beeinflussung des Präsenzerlebens

In Abbildung 8-8 ist das Präsenzrating in Abhängigkeit der visuell-haptischen Diskrepanz sowie der Referenzmodalität dargestellt: Unabhängig von der Wahrnehmungsschwelle nimmt mit zunehmender Diskrepanz das Präsenzrating ab. Diese Abnahme ist stärker, wenn die visuelle Modalität Referenz ist. Eine Modalitätsabhängigkeit jedoch zeichnet sich erst oberhalb der Wahrnehmungsschwelle ab.

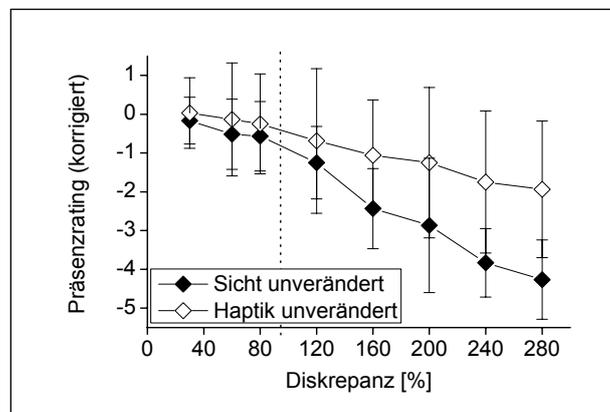


Abb. 8-8 Das am kongruenten Reiz relativierte Präsenzrating in Abhängigkeit der dargebotenen visuell-haptischen Diskrepanz: Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzrating ab.

Um den Einfluss von Diskrepanz und Referenzmodalität unterhalb der Wahrnehmungsschwelle zu testen, wurden die Einschätzungen an der Einschätzung des kongruenten Reizes relativiert. Die zweifaktorielle ANOVA zeigt einen signifikanten Einfluss der Diskrepanz (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.3,29.6)=43.12$, $p<0.01$; $\eta^2=0.768$).

Die Interaktion mit Referenzmodalität wird auf dem 1-% Signifikanzniveau nicht statistisch signifikant (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3.0,39.1)=3.39$, $p=0.027$; $\eta^2=0.207$). Referenzmodalität hingegen beeinflusste das Präsenzrating nicht ($F(1,13)=0.98$, $p=0.341$).

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Diskrepanz beeinflusste signifikant das Präsenzerleben ($F(2,26)=13.72$, $p<0.01$; $\eta^2=0.514$) und erklärt am meisten Varianz: Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzrating unterhalb der Wahrnehmungsschwelle linear ab ($F(1,13)=26.82$, $p<0.01$; $\eta^2=0.673$).

Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle. Für intermodale Diskrepanzen mit visuell-haptischen Abweichungen von mehr als 80% wurde der Einfluss von Diskrepanz geprüft. Intermodale Diskrepanz beeinträchtigt das Präsenzerleben signifikant ($F(4,52)=24.89$, $p<0.01$, $\eta^2=0.657$): Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzerleben linear ab (linearer Trend: $F(1,13)=47.81$, $p<0.01$; $\eta^2=0.786$).

8-1-2-4 Beeinflussung der Reaktionszeit

Um den Einfluss zunehmender Diskrepanz im Vergleich zur kongruenten Darstellung zu testen, wurden die um die Baseline korrigierten Daten zusätzlich an der Reaktionszeit bei kongruenter Darstellung relativiert. Eine zweifaktorielle ANOVA zeigte keinen signifikanten Einfluss von Diskrepanz (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.6,46.9)=0.74$, $p=0.557$) oder Referenzmodalität ($F(1,13)=3.34$, $p=0.091$). Auch die Interaktion zwischen Referenzmodalität und Diskrepanz wurde nicht statistisch signifikant (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.9,37.2)=0.42$, $p=0.729$).

8-1-2-5 Ergebnisse im Überblick

Welchen Einfluss Diskrepanzen, die unterhalb bzw. oberhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen, auf die wahrgenommene Stärke der Nachgiebigkeit sowie das Präsenzerleben haben, wurde exemplarisch für eine Standardnachgiebigkeit untersucht. Die Ergebnisse wurden in Tabelle 8-2 zusammengefasst.

Die intermodale Wahrnehmungsschwelle wurde erneut (in diesem Fall über die Konstanzmethode erhoben) überprüft und liegt zwischen 80-120% umgesetzter Diskrepanzen; es zeichnete sich kein Unterschied zwischen den Referenzmodalitäten ab (vgl. Abschnitt 7-1-6). Die Werte stimmen mit denen, ermittelt über simultanen Vergleich beider Modalitäten, überein.

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Es war erwartet worden, dass Diskrepanzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle die Stärke der Einschätzung bimodaler Nachgiebigkeit beeinflussen (Hypothese XIII-1); diese Annahme konnte nicht bestätigt werden: Weder Diskrepanz noch Referenzmodalität beeinflussten die Beurteilung der Nachgiebigkeit des Standardreizes, solange die intermodalen Abweichungen unterhalb der Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz lagen.

Diskrepanzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle beeinträchtigten jedoch das Präsenzerleben. Der Effekt war nicht erwartet worden und lässt sich auf die Erhebungsmethode zurückführen: Da die Probanden innerhalb eines Trials nicht nur angeben sollten, ob der Reiz diskrepanz war oder nicht, sondern neben der Stärke empfundener Nachgiebigkeit auch das Präsenzerleben beurteilen sollten, ist anzunehmen, dass die Beurteilung des Präsenzerlebens von den beiden anderen Maßen beeinflusst wurde. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde eine Nacherhebung nötig, die den Einfluss diskrepanter Darstellung auf das Präsenzerleben getrennt testen sollte (s. Abschnitt 8-1-5).

Tabelle 8-2 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock XIII „Evaluation – Einfluss bimodaler Inkongruenzen bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
XIII-1 Die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit wird vom Grad der Diskrepanz beeinflusst: Dies gilt unterhalb sowie oberhalb der Wahrnehmungsschwelle	bestätigt	kein Einfluss (unterhalb) $\eta^2=0.43$ (oberhalb)
XIII-2 Die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit wird von der Referenzmodalität beeinflusst. Dies gilt ober- sowie unterhalb der Wahrnehmungsschwelle	teilweise bestätigt	kein Einfluss (unterhalb) $\eta^2=0.70$ (oberhalb)
XIII-3 Mit zunehmender Diskrepanz oberhalb der Wahrnehmungsschwelle nimmt das Präsenzerleben ab	bestätigt	$\eta^2=0.79$ (oberhalb) $\eta^2=0.67$ (unterhalb)
XIII-4 Bleibt die visuelle Modalität unverändert, ist das Präsenzerleben stärker beeinträchtigt	n. bestätigt	

Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle. Mit zunehmender Diskrepanz nimmt, wie erwartet (Hypothese XIII-3), das Präsenzerleben linear ab. Darüber hinaus war angenommen worden, dass bei visueller Referenz das Präsenzerleben stärker beeinträchtigt wird (Hypothese XIII-4): Dieser Effekt konnte zwar tendenziös gezeigt werden, wurde jedoch nicht statistisch signifikant. Dies könnte daran liegen, dass die Probanden angaben, Unterschiede zwischen den Modalitäten leichter erkannt zu haben, wenn die haptische Modalität abwich (s. persoenenspezifische demografische Frage).

Intermodale Diskrepanzen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle resultieren in einer unterschiedlichen Wahrnehmung. Die Stärke der wahrgenommenen Nachgiebigkeit der Referenzmodalität (die dem Standardreiz entspricht) weicht modalitätsabhängig unterschiedlich stark von der Baseline ab: Die haptische Nachgiebigkeit wird als im Vergleich zur Baseline weniger nachgiebig eingeschätzt, während die visuelle Darstellung den Angaben ohne zusätzliche Darbietung der haptischen Modalität entspricht. Dementsprechend ist die wahrgenommene Ausprägung der Nachgiebigkeit in der variierenden Modalität unterschiedlich stark verzerrt: Die haptische Darstellung entspricht stärker der Baseline. Zusätzlich zeigt sich eine Abnahme der Verzerrung (d.h. des Unterschieds zur Baseline) mit zunehmender Diskrepanz. Die beiden Modalitäten können demzufolge mit zunehmender Diskrepanz besser voneinander getrennt wahrgenommen werden (vgl. Hypothese XIII-1).

Zusammengenommen bedeutet dies, dass bei visuell unveränderter und haptisch variierender Darbietung eine Trennung der Modalitäten erleichtert ist, was wiederum in einer Einschätzung der visuellen und haptischen Nachgiebigkeit resultiert, die von rein unimodaler Darbietung kaum abweicht. Bei haptisch unveränderter und visuell variierender Darbietung jedoch kann eine stärkere Verzerrung gegenüber der unimodalen Darstellung beobachtet werden.

8-1-3 Nacherhebung

Im vorangegangenen Kapitel war der Einfluss der intermodalen Diskrepanz auf das Präsenzerleben nach Beurteilung der Ausprägungsstärke der Nachgiebigkeit erhoben worden, was eine gegenseitige Beeinflussung aufgrund des Designs nicht ausschließen lässt. Ob sich der Einfluss der Diskrepanz auf das Präsenzerleben ändert, wenn nur die Qualität der Schnittstelle beurteilt wird, wurde in einer weiteren Studie überprüft. Im Unterschied zu der in Kapitel 8-1-3 vorgestellten Methode wurden die Probanden dieses Mal gebeten, die Nachgiebigkeit des Objektes zu untersuchen und entweder ihr Präsenzerleben oder die Stärke

wahrgenommener Diskrepanz (in einem zweiten Block) zu bewerten. Letzteres Maß diente als Performanzmaß: Es wurde erwartet, dass nicht nur mit zunehmender Diskrepanz oberhalb der Wahrnehmungsschwelle das Präsenzerleben abnehmen sollte, sondern auch die Stärke wahrgenommener Diskrepanz gegenläufig zunehmen sollte.

Hypothese XIIIIn-1: Intermodale Diskrepanz beeinflusst sowohl das Präsenzerleben als auch die Beurteilung der Stärke der Diskrepanz: Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzerleben ab und die Stärke der wahrgenommenen Diskrepanz zu. Dieser Einfluss wird oberhalb der Wahrnehmungsschwelle sichtbar; unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wird ein bedeutend geringerer bzw. kein Einfluss erwartet.

Zusätzlich wurde wie in der Untersuchung zuvor ein Einfluss der Referenzmodalität erwartet. Ist die visuelle Modalität Referenz, wurde erwartet, dass das Präsenzerleben stärker beeinflusst wird als bei unveränderter haptischer Modalität. Dieser Effekt war in der vorangegangenen Untersuchung nur tendenziell gezeigt worden und soll in dieser Untersuchung erhärtet werden. Desgleichen wird ein Einfluss auf die Beurteilung der Stärke der Diskrepanz erwartet: Ist die visuelle Modalität Referenz, fällt eine Abweichung der haptischen Modalität weniger gut auf; der Einfluss der Referenzmodalität war bereits auf das Diskriminierungsverhalten in Kapitel 7-1-5 gezeigt worden.

Hypothese XIIIIn-2: Die Referenzmodalität beeinflusst sowohl das Präsenzerleben als auch die Stärke wahrgenommener Diskrepanz: Bei visueller Referenzmodalität ist das Präsenzerleben stärker beeinträchtigt und die Stärke wahrgenommener Diskrepanz geringer.

8-1-3-1 Methode

Versuchsdesign. Die in der Nacherhebung erneut zu realisierenden Faktoren waren die intermodale *Diskrepanz* (s. Abschnitt 8-1-1) sowie die unveränderte (Referenz-) *Modalität* (visuell, haptisch). Während Diskrepanz erneut, wie in Abschnitt 8-1-1, als Innersubjektfaktor umgesetzt wurde, wurde für die Nacherhebung Referenzmodalität nicht über die LED signalisiert, sondern als Gruppenfaktor gewählt (haptische Referenz Gruppe H, visuelle Referenz Gruppe V).

Wie in Abschnitt 8-1-1 wurde Präsenzerleben über dieselbe Frage im Anschluss an jede Reizpräsentation erfasst. Die neun vorgestellten Stimuli wurden dazu jeweils viermal randomisiert im Testblock „Präsenz“ dargeboten.

Zusätzlich wurde die Einschätzung der Stärke wahrgenommener Diskrepanz erhoben: Die Probanden wurden instruiert, zuerst über den Joystick einzugeben, ob sie einen Unterschied bezüglich der Diskrepanz gespürt hatten; im Anschluss daran schätzten sie die Stärke der wahrgenommenen Diskrepanz zwischen „0“ (keine) und „10“ (sehr stark) ein. Die neun intermodal differierenden Reize wurden den Probanden achtmal wiederholt randomisiert im Testblock „Diskrepanz“ dargeboten.

Um eine gegenseitige Beeinflussung zwischen der Erhebung von Präsenzerleben und anderen erhobenen Maßen auszuschließen, wurden beide Einschätzungen getrennt voneinander in unterschiedlichen Testblöcken (Präsenz, Diskrepanz) adressiert. Die Reihenfolge der Messung der beiden abhängigen Variablen wurde als weiterer Gruppenfaktor (neben Referenzmodalität) eingeführt. Am Testende wurde, zusätzlich zum Immersionsfragebogen (s. Anhang D), den Probanden der um eine Frage erweiterte demografischen Fragebogen vorgelegt (s. Abbildung 7-14 Gruppe A).

Versuchsdurchführung. Während der visuell-haptisch kongruenten Darstellung des nachgiebigen Würfels über das HSI wurden die Probanden in den Testablauf eingewiesen; eine Hälfte der Gruppe mit haptischer Referenz (Gruppe H) erhielt vor Testbeginn keinen kongruenten Stimulus. Der weitere Testablauf hing von dem Gruppenfaktor „Reihenfolge der Testblöcke“ (Gruppe D, P) ab und wird im Folgenden für die beiden Gruppen getrennt skizziert.

Gruppe D. In Gruppe D wurde vor Beginn des ersten Testblocks der Baseline-Reaktionstest (wie in Kapitel 8-1-2 beschrieben) durchgeführt. Im Anschluss an jede Reizdarbietung wurde die Antwortzeit (Unterschied wahrgenommen ja / nein) erfasst und die Einschätzung der intermodalen Diskrepanz protokolliert. Nach Beendigung des Testblocks zur Messung wahrgenommener Diskrepanz füllten die Probanden den Immersionsfragebogen sowie den demografischen Fragebogen aus. Dieser Zwischenblock diente der klaren Trennung zwischen den Testblöcken und dazu, eine gegenseitige Beeinflussung zu reduzieren. Zuletzt erfolgte der Testblock zur Präsenzmessung, der im Folgenden näher erläutert wird.

Gruppe P. Gruppe P begann mit dem Testblock zur Präsenzmessung: Ihre Aufgabe war, nach jeder Reizdarbietung ihr Präsenzerleben zu beurteilen. Mit Beendigung des Testblocks füllten die Probanden den Immersionsfragebogen aus und absolvierten die Baseline-Messung für die Reaktionszeit. Im Anschluss daran erfolgte der Testblock zur Messung der eingeschätzten Diskrepanz, wie bereits für Gruppe D dargestellt wurde.

Statistische Analyse. Vor Hypothesenprüfung wurden alle individuellen Beurteilungen der Stärke wahrgenommener Diskrepanz pro Proband normiert, so dass ihre geringste Ausprägung 0% und die höchste 100% entspricht (s. Kapitel 5-1-3). Die wiederholten Messwerte wurden für (die an der Baseline korrigierte) Antwortzeit, Präsenzerleben sowie Diskrepanzeinschätzung gemittelt und am kongruenten Reiz relativiert, um die Werte über die Gruppen vergleichbar zu machen.

Da der Gruppenfaktor „Reihenfolge der Erhebung“ weder das Präsenzerleben ($F(1,26)=3.3$, $p=0.08$) noch die eingeschätzte Stärke wahrgenommener Diskrepanz ($F(1,26)=0.7$, $p=0.40$) oder die Trefferrate ($F(1,26)=3.6$, $p=0.07$), wie über eine MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) getestet wurde, beeinflusste, wurde der Faktor in der weiteren Analyse nicht mehr berücksichtigt. Die MANOVA zeigte jedoch einen signifikanten Einfluss des kongruenten Testreizes auf das Präsenzrating ($F(1,26)=13.5$, $p<0.05$; $\eta^2=0.34$), das Diskrepanzrating ($F(1,26)=25.4$, $p<0.05$; $\eta^2=0.49$) sowie die Trefferrate ($F(1,26)=13.4$, $p<0.05$; $\eta^2=0.34$): Das vorherige Präsentieren des kongruenten Reizes wirkte sich positiv auf alle drei abhängigen Variablen aus. Auch die Interaktion zwischen dargestellter intermodaler Diskrepanz und Darbietung des kongruenten Testreizes wurde signifikant ($F(21,546)=4.3$, $p<0.05$, $\eta^2=0.14$). Aus diesem Grund werden die Probanden (aus Gruppe H) ohne Präsentation des kongruenten Reizes während des Trainings aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Der Einfluss der *Diskrepanz* und der *Referenzmodalität* auf das Präsenzrating wurde zuerst über eine ANOVA mit Messwiederholung geprüft; bei einem signifikanten Einfluss der Diskrepanz wurde getrennt für Werte ober- und unterhalb der Wahrnehmungsschwelle auf eine Beeinflussung des Präsenzerlebens getestet. Der Einfluss auf die Beurteilung der Stärke wahrgenommener Diskrepanz sowie die Trefferrate wurde zuerst über eine MANOVA getestet und, wenn der Faktor Diskrepanz signifikant war, wurde der Einfluss ober- und unterhalb der Wahrnehmungsschwelle getrennt geprüft. Einfluss von Diskrepanz und Referenzmodalität auf die Reaktionszeit wurde mit einer ANOVA überprüft. Alle F-Statistiken wurden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 1% festgesetzt.

8-1-3-2 Ergebnisse

Stichprobe. An der Nacherhebung (XIIIIn) zur Evaluation des Einflusses bimodaler Inkongruenzen von Objektnachgiebigkeit nahmen 30 Studenten der Technischen Universität und der Ludwigs-Maximilians-Universität München teil. Einer Hälfte wurden Stimuli dargeboten, bei denen die visuelle Modalität (Gruppe V) unverändert blieb; die andere Hälfte explorierte Stimuli mit unveränderter haptischer Modalität (Gruppe H). Aus Gruppe H mussten 7 Personen aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Das mittlere Alter der verbleibenden 8 Personen (4 Männer, 4 Frauen) betrug 23 Jahre. In Gruppe V nahmen 9 Männer und 6 Frauen teil, deren mittleres Alter 25 Jahre betrug. Alle Probanden waren Rechtshänder und waren normalsichtig oder trugen eine Sehhilfe.

Personenvariable. Die Probanden beurteilten im Immersionsfragebogen ihre emotionale Involvierung (Gruppe H: MW = 23.4, sd = 5.9; Gruppe V: MW = 28.2, sd = 6.4) sowie ihren Grad der Involviertheit (Gruppe H: MW = 17.4, sd = 5.8; Gruppe V: MW = 21.2, sd = 5.5). Beide Gruppen wichen in ihren Werten nicht von denen der Eichstichprobe ab; auch unterschieden sie sich weder in ihrem Grad der Involvierung ($F(1,21)=2.41$, $p=0.163$) noch in ihrer emotionalen Involvierung ($F(1,21)=0.44$, $p=0.513$) signifikant voneinander, wie über eine MANOVA geprüft wurde. Beide Faktoren korrelierten weder mit Präsenzrating noch mit der Einschätzung der wahrgenommenen Stärke der Diskrepanz oder Trefferrate. Die Ergebnisse können somit auf die experimentellen Manipulationen zurückgeführt werden.

Zusätzlich beurteilten die Probanden im Anschluss an den Testblock D, bei welcher sich verändernden Modalität es ihnen besonders leicht fiel, ihre Aufgabe zu erfüllen. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich in der Gruppe V nur die haptische und in Gruppe H nur die visuelle Modalität änderte. Die Probanden gaben an, dass es ihnen besonders leicht fiel, wenn die haptische (Gruppe V: $n=4$, Gruppe H: $n=1$), die visuelle (Gruppe V: $n=1$, Gruppe H: $n=4$) Modalität sich änderte bzw. für beide gleich (Gruppe V: $n=10$, Gruppe H: $n=3$). Die Angaben korrelierten nicht mit den Daten.

Wahrgenommene Stärke der intermodalen Diskrepanz sowie Trefferrate. In Abbildung 8-9 sind die Wahrscheinlichkeit, korrekt zu antworten (Trefferrate) sowie die durchschnittlich angegebene Ausprägungsstärke wahrgenommener Diskrepanz (Diskrepanzrating) wiedergegeben. Mit zunehmender Diskrepanz erhöht sich die Trefferrate (s. Abbildung 8-9A) sowie die Einschätzung der Diskrepanzstärke (s. Abbildung 8-9B). Referenzmodalität scheint die Trefferrate nicht zu beeinflussen, hingegen das Diskrepanzrating mit zunehmender intermodaler Inkongruenz. Um den Einfluss der intermodalen Abweichung zu prüfen, wird zuerst mit einer MANOVA ein genereller Einfluss auf die beiden abhängigen Variablen und, bei signifikantem Ergebnis, für beide Variablen getrennt auf Signifikanz getestet.

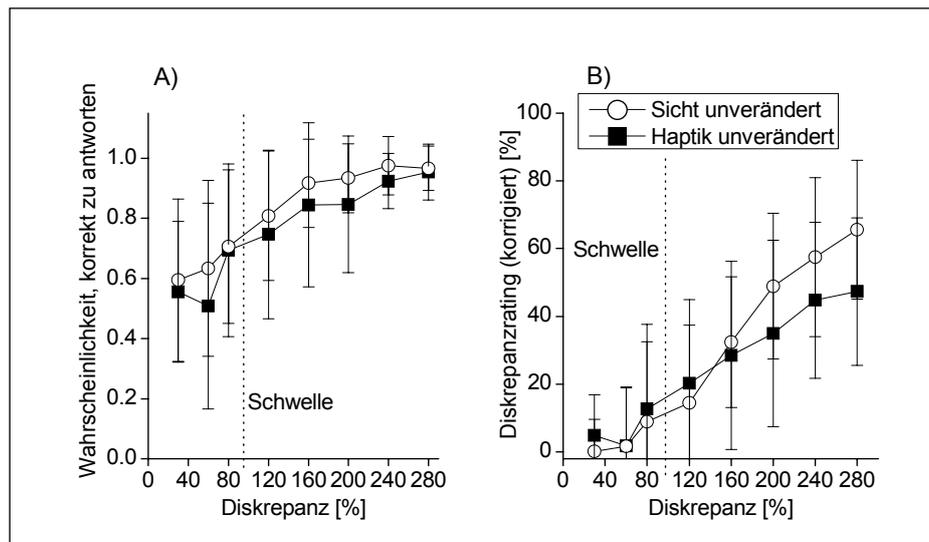


Abb. 8-9 Trefferrate (A) sowie Beurteilung der wahrgenommener Stärke der Diskrepanz (relativiert am kongruenten Reiz) nimmt mit zunehmender tatsächlicher intermodaler Diskrepanz zu und dies stärker, wenn die Sicht unverändert bleibt (Gruppe V).

Die MANOVA zeigt einen signifikanten Einfluss der intermodalen Diskrepanz auf beide abhängigen Variablen ($F(14,294)=16.61$, $p<0.01$; $\eta^2=0.442$) sowie eine signifikante Interaktion ($F(14,294)=2.83$, $p<0.01$; $\eta^2=0.119$). Referenzmodalität beeinflusste weder das Diskrepanzrating ($F(1,21)=0.28$, $p=0.606$) noch die Trefferrate ($F(1,21)=0.89$, $p=0.356$).

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle für intermodale Diskrepanzen beeinflusst die tatsächliche intermodale Diskrepanz weder die Trefferrate ($F(2,42)=3.02$, $p=0.06$) noch das Diskrepanzrating (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.9,27.8)=5.29$, $p=0.021$). Die Interaktion wird weder für die Trefferrate ($F(2,42)=0.50$, $p=0.613$) noch das Diskrepanzrating signifikant (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.9,27.8)=0.30$, $p=0.654$).

Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle hingegen lässt sich ein deutlicher Einfluss der intermodalen Diskrepanz auf das Diskrepanzrating ($F(4,84)=67.43$, $p<0.01$, $\eta^2=0.763$) bestätigen, der auf einen linearen Trend zurück geht ($F(1,21)=141.66$, $p<0.01$; $\eta^2=0.871$). Zum anderen nimmt, wenn auch deutlich effektschwächer, auch die Trefferrate mit zunehmender Diskrepanz zu (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.1,43.6)=7.94$, $p<0.01$; $\eta^2=0.274$). Die Interaktion mit Referenzmodalität beeinflusst das Diskrepanzrating ($F(4,84)=6.24$, $p<0.01$; $\eta^2=0.229$), nicht jedoch die Trefferrate (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.1,43.6)=0.29$, $p=0.756$). Wie in Abbildung 8-9B zu erkennen ist, geht die Interaktion auf eine stärker ansteigende Zunahme wahrgenommener Ausprägungsstärke mit zunehmender intermodaler Abweichung zurück, wenn die Sicht unverändert bleibt.

Präsenzrating. In Abbildung 8-10 ist das (am kongruenten Reiz relativierte) Präsenzrating in Abhängigkeit der visuell-haptischen Diskrepanz sowie der Referenzmodalität (Gruppenfaktor) dargestellt: Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle zeichnet sich eine deutliche Abnahme des Präsenzerlebens ab; zusätzlich wird ein Einfluss der Referenzmodalität sichtbar.

Eine zweifaktorielle ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt der intermodalen Diskrepanz (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3.2,67.6)=41.65$, $p<0.01$; $\eta^2=0.665$) sowie einen Einfluss der Referenzmodalität ($F(1,21)=6.51$, $p<0.01$; $\eta^2=0.236$). Dieser geht auf ein allgemein reduziertes Präsenzerleben bei visueller Referenz zurück. Die Interaktion beeinflusst das Präsenzerleben nicht statistisch bedeutsam auf dem 1%-Signifikanzniveau (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(3.2,67.6)=5.55$, $p=0.019$; $\eta^2=0.209$) und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

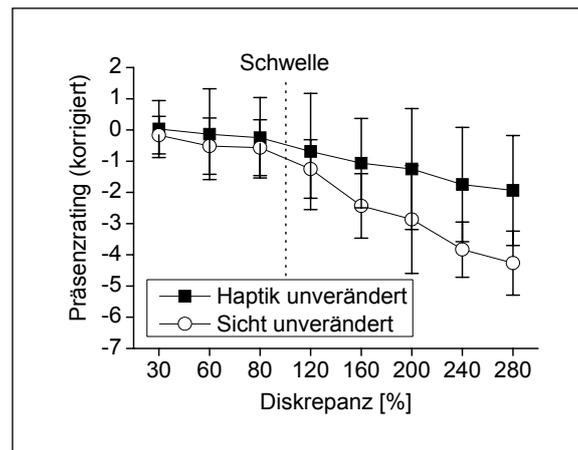


Abb. 8-10 Einschätzung des Präsenzerlebens (relativiert am kongruenten Reiz) nimmt mit zunehmender intermodaler Diskrepanz in beiden Gruppen ab, stärker jedoch, wenn die Sicht unverändert bleibt (Gruppe V).

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle beeinflusst weder Diskrepanz ($F(2,42)=1.73$, $p=0.190$) noch Referenzmodalität das Präsenzerleben ($F(1,21)=0.67$, $p=0.423$).

Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle lässt sich ein Einfluss der diskrepanten Darstellung auf das Präsenzerleben nachweisen (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(2.5,52.7)=29.06$, $p<0.01$; $\eta^2=0.580$): Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzrating unterhalb der Wahrnehmungsschwelle linear ab ($F(1,21)=105.84$, $p<0.01$; $\eta^2=0.834$). Auch die Variation der unveränderten Referenzmodalität beeinflusst das Präsenzerleben signifikant, wenngleich auch nur mit mittlerem Effekt ($F(1,21)=8.603$, $p<0.01$; $\eta^2=0.291$): Das Präsenzerleben ist weniger beeinträchtigt, wenn die haptische Modalität unverändert dargeboten wird.

Reaktionszeit. Die Antwortzeit der Probanden wurde an ihrer Baseline-Messung sowie am kongruenten Reiz relativiert. Eine zweifaktorielle ANOVA testete den Einfluss von Diskrepanz und Gruppe: Weder intermodale Diskrepanz (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.9,38.0)=0.71$, $p=0.492$) noch Referenzmodalität ($F(1,20)=0.09$, $p=0.764$) oder der Interaktion (Greenhouse-Geisser korrigiert: $F(1.9,38.0)=0.92$, $p=0.403$) beeinflussten die Reaktionszeit.

8-1-3-3 Diskussion

Der Einfluss inkongruenter visuell-haptischer Reize sowie der Referenzmodalität auf das Präsenzerleben wurde in Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle für intermodale Diskrepanzen untersucht. Inkongruenzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle beeinträchtigten das Präsenzerleben nicht, während zunehmende visuell-haptische Inkongruenzen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle zu einer linearen Abnahme des Präsenzerlebens führten (s. Hypothese XIIIIn-1). Auch reduzierte sich bei visueller Referenz das Präsenzerleben stärker (Hypothese XIIIIn-2).

Die Einschätzung der tatsächlichen Stärke der Diskrepanz zeigte einen erwarteten gegenläufigen Trend: Mit zunehmender intermodaler Diskrepanz oberhalb der Schwelle nimmt die Einschätzung der Stärke der Diskrepanz zu. Referenzmodalität beeinflusste das Diskrepanzrating nur in Abhängigkeit der Diskrepanz: Mit zunehmender Diskrepanz wurde bei visueller Referenz die wahrgenommene Diskrepanz als ausgeprägter beurteilt.

Tabelle 8-3 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentalblock XIII-n „Evaluation – Einfluss bimodaler Inkongruenzen bei der Wahrnehmung von Nachgiebigkeit“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
XIII-n-1 Oberhalb der Toleranzgrenze für intermodale Abweichungen nimmt mit zunehmender Diskrepanz das Präsenzerleben ab und die Einschätzung der Ausprägungsstärke der wahrgenommenen Diskrepanz zu.	bestätigt	Präsenzerleben: $\eta^2=0.83$ (oberhalb) Diskrepanzrating: $\eta^2=0.20$ (unterhalb) $\eta^2=0.87$ (oberhalb)
XIII-n-2 Referenzmodalität beeinflusst sowohl das Präsenzerleben als auch die Stärke wahrgenommener Diskrepanz	teilweise bestätigt	Präsenzerleben: $\eta^2=0.29$ Diskrepanzrating: $\eta^2=0.23$ (WW mit Diskrepanz)

Die Nacherhebung bestätigte und erweiterte die Ergebnisse der ersten Untersuchung: Mit zunehmender wahrgenommener intermodaler Inkongruenz nahm das Präsenzerleben linear ab, während bei perzeptueller Inkongruenz das Präsenzerleben unbeeinflusst blieb. Wie erwartet worden war, jedoch in der ersten Untersuchung nicht bestätigt werden konnte, zeigte sich bei der Nacherhebung ein Einfluss der Referenzmodalität auf das Präsenzerleben in Richtung der Erwartung: Bei visueller Referenz nahm das Präsenzerleben stärker ab.

8-1-4 Allgemeine Diskussion

Der Einfluss intermodaler Diskrepanzen auf das Präsenzerleben, insbesondere auf die Bewertung der Qualität der Schnittstelle, konnte in beiden Untersuchungen überzeugend nachgewiesen werden: Besonders oberhalb der Wahrnehmungsschwelle für intermodale Diskrepanzen nimmt mit zunehmendem intermodalen Konflikt die Beurteilung des Präsenzerlebens linear ab. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit Forschungsergebnissen (z.B. IJsselstein et al., 2000; Mantovani & Riva, 1999; Witmer & Singer, 1998; Barfield et al., 1995; Sheridan, 1992b). Die Qualität der Schnittstelle (als ein Faktor des Präsenzerlebens) ist gering, wenn Inkongruenzen in der visuellen und haptischen Darstellung auftreten (s. Abbildung 8-11).

Darüber hinaus führt eine intermodal diskrepante Darstellung zu einer Veränderung der Stärke wahrgenommener Nachgiebigkeit oberhalb der Wahrnehmungsschwelle (unterhalb trat kein Unterschied zwischen Beurteilung eines kongruenten oder perzeptuell kongruenten Reizes auf): Mit zunehmender Diskrepanz reduziert sich die Verzerrung in der variierten Modalität. Auch die Stärke wahrgenommener Diskrepanz oberhalb der Wahrnehmungsschwelle wurde als linear ansteigend beurteilt: Auch hier waren die Probanden in der Lage Unterschiede in der dargestellten Diskrepanz zu quantifizieren.

Werden haptische Informationen über die Nachgiebigkeit eines Objektes relativ zur Darstellung der visuellen Eindringtiefe weniger exakt dargestellt, nimmt das Präsenzerleben dramatisch ab und die Einschätzung des Konflikts zu. Dies deutet darauf hin, dass es den Probanden leichter fällt, Abweichungen der haptischen Modalität von der visuellen Referenzmodalität zu detektieren. Dies ist, beachtet man die Ergebnisse aus Abschnitt 7-1 nicht weiter verwunderlich: Auch hier zeigte sich bereits, dass die haptische Modalität die Wahrnehmung von Nachgiebigkeit zu dominieren scheint.

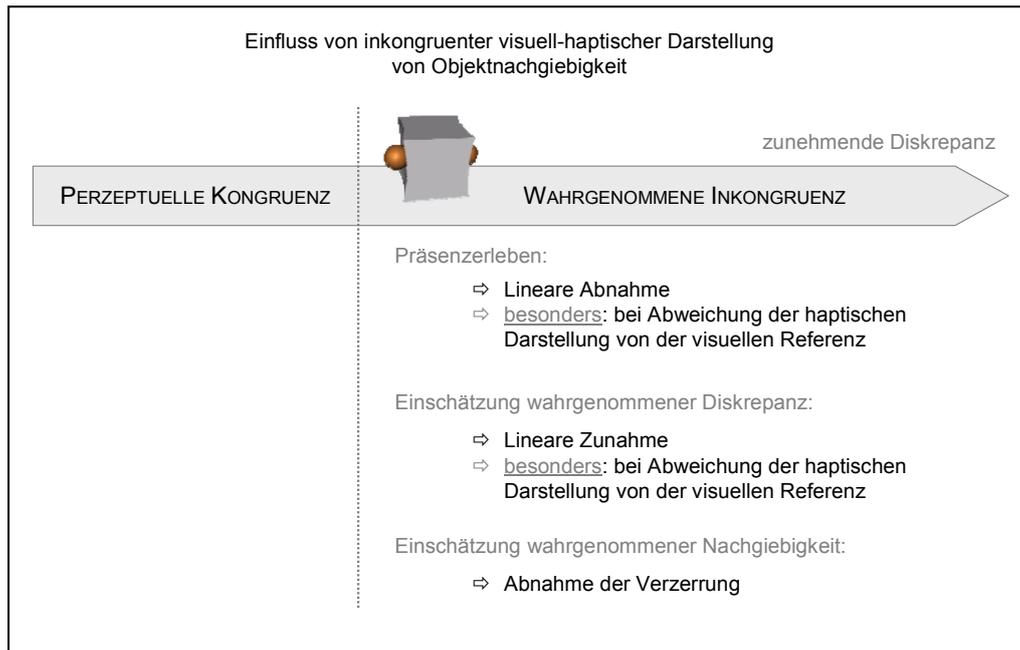


Abb. 8-11 Einfluss intermodal inkongruenter Darstellung von Objektnachgiebigkeit auf die wahrgenommene Ausprägungsstärke der Inkongruenz, auf das Präsenzerleben sowie die Einschätzung wahrgenommener Nachgiebigkeit.

Darüber hinaus deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Diskrepanzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle weder zu einer Veränderung der Wahrnehmung der Nachgiebigkeit führen, noch das Präsenzerleben beeinflussen. Übersteigen jedoch die intermodalen Diskrepanzen die Wahrnehmungsschwelle, so nimmt sowohl das Präsenzerleben rasch ab als auch die Wahrnehmung der Diskrepanzen zu. Dies bedeutet, dass intermodale Inkongruenzen tolerierbar sind, solange sie unterhalb der Detektionsschwelle liegen.

8-2 Bimodale Inkongruenzen bei der Darstellung von Objektkanten

In Abschnitt 8-1 stand der Einfluss visuell-haptischer Konflikte bei der Exploration von Objektnachgiebigkeit im Vordergrund der Untersuchungen. Es konnte dabei ein Zusammenhang in Abhängigkeit der von Marks (2004) eingeführten Unterscheidung in perzeptuell kongruente und inkongruente Darstellung gefunden werden: Lagen die visuell-haptischen Inkongruenzen unterhalb der Wahrnehmungsschwellen, ließ sich weder eine Beeinträchtigung des Präsenzerlebens noch eine Veränderung in der subjektiven Stärke empfundener Nachgiebigkeit nachweisen. Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle war jedoch nicht nur die Beurteilung der Stärke der Diskrepanz erleichtert, sondern es ließ auch das Präsenzerleben rasch nach. Dass eine Verschlechterung in der Qualität der Darstellung sich auf das Konstrukt Präsenzerleben auswirkt, war erwartet worden: Die Qualität der Schnittstelle ist ein bedeutender Faktor, der zu einem hohen Präsenzerleben beiträgt (z.B. IJsselstein et al., 2000; Mantovani & Riva, 1999; Witmer & Singer, 1998; Sheridan, 1992b).

In Anlehnung an diese Ergebnisse wird desgleichen für die Wahrnehmung von zweidimensionalen Objektkanten – und damit wesentlicher Geometriemerkmale von Objekten in virtueller Umgebung – erwartet, dass bei visuell unveränderter Information abweichende haptische Informationen zu einer Beeinträchtigung des Präsenzerlebens führen, falls die Diskrepanzen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen. Zusätzlich wirkt sich die erhöhte Diskriminierbarkeit auf die Performanz aus: Oberhalb der Schwelle wird die Wahrscheinlichkeit, die fehlerhafte Darstellung korrekt zu detektieren, zunehmen.

Hypothese XIV-1: Intermodale Diskrepanzen beeinflussen das Präsenzerleben: Mit zunehmender intermodaler Abweichung oberhalb der Wahrnehmungsschwelle nimmt das Präsenzerleben linear ab. Desgleichen nimmt mit zunehmender Diskrepanz oberhalb des intermodalen JND-% die Beurteilung der Stärke der Diskrepanz wie auch die Wahrscheinlichkeit zu, die fehlerhafte Darstellung zu detektieren.

Es konnte gezeigt werden, dass sich in Abhängigkeit der Winkelgröße das Auflösungsvermögen von Objektkanten veränderte und zusätzlich auch die Höhe der intermodalen Schwelle variierte (s. Abschnitt 7-2-4). Dieser sog. Oblique-Effekt resultierte in einer deutlichen Unterlegenheit der Wahrnehmung spitzer Objektkanten im Vergleich zu rechtwinkligen Objektkanten. Es wird daher erwartet, dass sich die Art der Objektkante auch auf Präsenzerleben, die Detektierbarkeit der inkongruenten Darstellung sowie die Einschätzung der Stärke der Diskrepanz auswirkt.

Hypothese XIV-2: Der Standardwinkel beeinflusst das Präsenzerleben, die Trefferrate und die Stärke wahrgenommener Diskrepanz.

8-2-1 Methode

Stimuli. Als Standardstimuli wurden die beiden Winkelgrößen 45° und 90° in Anlehnung an die Experimente aus Abschnitt 7-2 herangezogen und eine Positionierung nach Kapitel 7-2-4 (Positionierung A) ausgewählt. Um die Suchaufgabe für den Experimentalblock D effektiv umsetzen zu können, wurden drei Dreiecke so positioniert, dass die relevanten Objektkanten (90° , 45°) nach oben zeigten (s. Abbildung 8-12). Eine der drei Objektkanten wurde haptisch inkongruent dargestellt; um demzufolge zu verhindern, dass beim Abfahren der Kanten zusätzliche Hinweise über die Diskrepanz gegeben wurde, wurden die Dreiecke mit deutlichem Abstand auf der Ebene positioniert (s. Abbildung 8-12). Die visuelle Umsetzung erfolgte vor einem schwarzen Hintergrund.

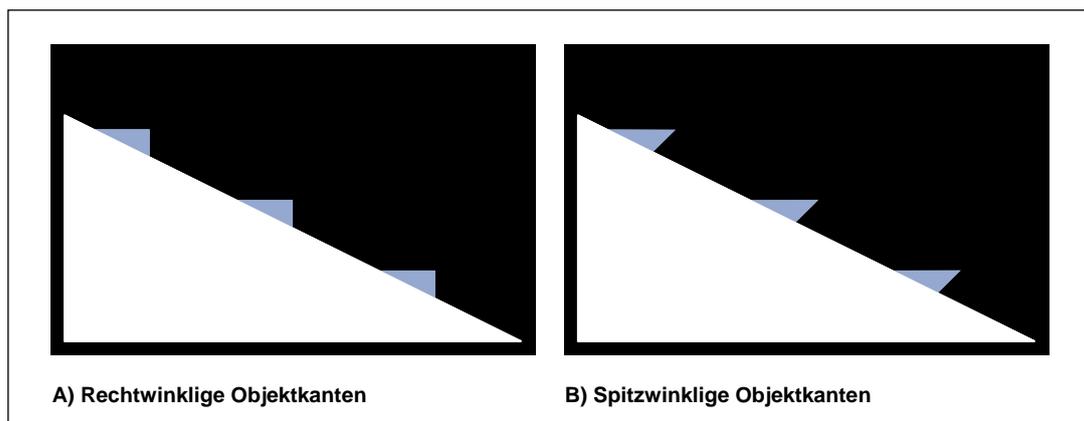


Abb. 8-12 Visuelle Umsetzung der beiden Reizklassen: Links im Bild für rechtwinklige Objektkanten und rechts im Bild für spitzwinklige Objektkanten, beide wurden auf eine dreieckige Ebene aufgesetzt. Haptisches Feedback wurde bei Berührung der Kanten als der Ebene gegeben.

Es wurden somit zwei Reizklassen umgesetzt: Rechtwinklige und spitzwinklige Objektkanten. Während die beiden Reizklassen in ihrer visuellen Darstellung unverändert blieben, wurde für eine der drei Kanten eine haptische Abweichung eingeführt: Die Diskrepanzen waren alle positiv (d.h. waren größer als der Standardwinkel von 90° oder 45°). Folgende Abweichungen der haptischen Darstellung von dem Standardwinkel wurden realisiert: 0% (kongruente Darstellung), 30% und 60% (perzeptuell inkongruente Darstellung), 100% (Schwelle entnommen aus den Ergebnissen s. Abschnitt 7-2-4), sowie 130%, 160% und 200% als Inkongruenzen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle.

Versuchsdesign. Um sowohl den Einfluss von Diskrepanz auf das Präsenzerleben als auch die Beurteilung der Stärke der intermodalen Abweichung sowie die korrekte Antwortwahrscheinlichkeit erheben und vergleichen zu können, wurde das Experiment wie auch schon in Abschnitt 8-1-4 in zwei Experimentalblöcke untergliedert. In einem Experimentalblock (Block P) wurde die Einschätzung der Güte der Schnittstelle erhoben, im zweiten (Block D) die Performanz (Wahrscheinlichkeit, korrekt zu antworten) sowie die Einschätzung der Stärke der Diskrepanz. Die Reihenfolge der Blöcke wurde zwischen den Teilnehmern randomisiert. Der Ablauf innerhalb der Blöcke war jeweils vergleichbar.

Im Experimentalblock P wurden wie oben angegeben die beiden *Standardwinkel* (45° , 90°) auf jeder der drei definierten *Positionen* (1, 2, 3) in allen sieben *Diskrepanzabstufungen* (0, 30, 60, 100, 130, 160 sowie 200%) randomisiert dargeboten. Jede der 42 möglichen Kombinationen wurde je zweimal dargeboten. Der Proband beurteilte die Darstellung jeder Reizdarbietung auf einer 7-stufigen Ratingskala anhand eines Items aus dem Präsenzfragebogen

von Scheuchenpflug (s. auch Abschnitt 8-2), nämlich „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit ihrer Umgebung?“.

Im Experimentalblock D wurden dieselben Reize jedoch ohne die kongruente Darstellung jeweils viermal zufällig präsentiert (je 36 Kombinationen). Zuerst suchten die Probanden die Position der fehlerhaften Darstellung (Antwortmöglichkeit: Position 1, 2 oder 3) und bewerteten im Anschluss die Stärke der intermodalen Diskrepanz zwischen „1“ (sehr gering) und „10“ (sehr stark). Demzufolge war die Reihenfolge der Darbietung der Experimentalblöcke ein Zwischengruppenfaktor, die anderen Faktoren (Winkel, Position, Diskrepanz) wurden als Innersubjektfaktoren erhoben.

Jeweils nach Beendigung des ersten Experimentalblocks (P, D) wurden die Probanden gebeten, den Immersionsfragebogen auszufüllen (s. Anhang D).

Versuchsdurchführung. Das in Abschnitt 7-2-2 dargestellte HSI diente erneut als Experimentalumgebung, wurde jedoch von der Sichtblende um den TFT-Monitor sowie dem Sichtschutz für das PHANOTM® Ein-/Ausgabegerät (s. Abbildung 7-19) befreit und der Abstand zwischen Monitor und haptischen Interface reduziert, um „realistische“ Arbeitsplatzbedingungen zu gewährleisten.

Der Ablauf erfolgte in Abhängigkeit der Gruppe P und D unterschiedlich. Gruppe P durchlief zuerst Block P, beantwortete dann den Immersionsfragebogen und absolvierte zuletzt Block D, während Gruppe D mit Block D begann und nach dem Ausfüllen des Immersionsfragebogens Block P absolvierte. Im Folgenden wird kurz auf den Ablauf innerhalb der beiden Experimentalblöcke gesondert eingegangen.

Block P. Vor Beginn des Experimentalblocks P wurden die Probanden instruiert, dass eine virtuelle Umgebung evaluiert werden solle. Die Probanden wurden gebeten die Darstellung gemäß der Frage zum Präsenzerleben über eine 7-stufigen Skala zu bewerten.

Block D. Im Experimentalblock D wurden die Probanden instruiert, dass fehlerhafte Darstellungen in der virtuellen Umgebung auftreten können. Ihre Aufgabe sei es, die drei Reize mehrfach abzufahren und die Darstellung herauszufinden, die sich von den anderen beiden unterscheiden würde. Wenn ihnen die Wahl schwer fiel, wurden sie gebeten, den Reiz zu auswählen, der ihrer Ansicht nach am ehesten abweichen könne. Nach der Benennung der Position des fehlerhaften Dreiecks (1, 2 oder 3) wurden die Teilnehmer aufgefordert, die Stärke der wahrgenommenen Diskrepanz mit einem beliebigen Wert zwischen 1 und 10 zu beurteilen.

Statistische Analyse. Mit einer MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) wurde der mögliche Einfluss der Reihenfolge der Experimentalblöcke bestimmt. Es zeigte sich weder eine signifikante Beeinflussung der Trefferrate ($F(1,17)=0.19$, $p=0.667$), noch des Diskrepanzratings ($F(1,17)=0.02$, $p=0.893$) oder des Präsenzerlebens ($F(1,17)=2.31$, $p=0.142$). Der Faktor wurde demzufolge in der weiteren Analyse nicht beachtet.

Die Auswertung erfolgte nach den Experimentalblöcken getrennt. In einem ersten Schritt wurden in Block D pro Bedingung die Wahrscheinlichkeit, korrekt zu antworten, bestimmt. Die Auswertung des Diskrepanzratings erfolgte wie in Abschnitt 8-1-4 beschrieben: Die individuellen Einschätzungen der Stärke der Diskrepanz wurden normiert, so dass ihre geringste Ausprägung 1% und die höchste 100% entsprechen. Die wiederholten Messwerte wurden in Abhängigkeit der Reizbedingung gemittelt. Für beide abhängigen Variablen wurde eine MANOVA (Prüfgröße Pillai-Spur) gerechnet, um den Einfluss von *Diskrepanz*, *Position* der fehlerhaften Darstellung sowie *Art der Objektkante* zu ermitteln. Signifikante Effekte wurden zusätzlich univariat getestet.

In einem zweiten Schritt wurden innerhalb von Block P die Werte der Präsenzfrage über die beiden Wiederholungen pro Kombination gemittelt, die Ergebnisse an der kongruenten Darstellung relativiert und deskriptiv ausgewertet. Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine dreifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *Position* der fehlerhaften Darstellung, *Art der Objekt-*

kante sowie *diskrepante Darstellung* (30-200%) berechnet und der Einfluss der Positionierung des Fehlers überprüft. Im Anschluss daran wurden die Hypothesen getrennt für Diskrepanzen unterhalb (30, 60%) und oberhalb (100-200%) getestet.

Alle F-Statistiken wurden, wenn nötig, für Verletzungen der angenommenen Sphärizität durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur korrigiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 1% festgesetzt.

8-2-2 Experimentalblock XIV –Evaluation inkongruenter Darstellung von Kanten

8-2-2-1 Stichprobe und Personenvariablen

Stichprobe. Am Experimentalblock XIV „Evaluation – Einfluss bimodaler Inkongruenzen auf die Wahrnehmung von Objektkanten“ nahmen 20 Studenten und Angehörige der Universität der Bundeswehr München teil. Eine Person musste aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, da ihre Antworten eine zu geringe Varianz aufwiesen. Die verbleibenden 19 Personen (13 Männer, 6 Frauen) waren im Schnitt 26 Jahre alt. Alle Probanden waren Rechtshänder und normalsichtig oder trugen ihre Sehkorrektur.

Personenvariablen. Am Ende des Experiments beantworteten die Probanden die Subskala Immersive Tendenz aus dem Präsenzfragebogen von Scheuchenspflug (2001). Die beiden Faktoren emotionale Involvierung (MW = 23.8, sd = 5.2) und Grad der Involvierung (MW = 18.0, sd = 5.6) wichen nicht statistisch signifikant von der Eichstichprobe ab. Die Faktoren korrelierten weder mit der Beurteilung des Präsenzerlebens noch mit der Anzahl richtiger Antworten noch mit der Einschätzung wahrgenommener Diskrepanz. Die Ergebnisse können somit auf die experimentelle Manipulation zurückgeführt werden.

8-2-2-2 Beeinflussung der Trefferrate sowie des Diskrepanzratings

In Abbildung 8-14B wurde die Wahrscheinlichkeit, die korrekte Position der fehlerhaften Darstellung wiederzugeben, gegen die tatsächliche Diskrepanz für beide Objektkanten (45°, 90°) abgetragen. Mit einer Diskrepanz von 100% (entspricht der intermodalen Schwelle, berechnet in Abschnitt 7-2-4) steigt die Wahrscheinlichkeit, richtig zu antworten, deutlich an. (Die Ratewahrscheinlichkeit liegt bei drei Antwortalternativen bei 33%).

Tabelle 8-6 F-Statistiken der dreifaktoriellen MANOVA mit Messwiederholung für die beiden abhängigen Variablen Trefferrate und Diskrepanzrating.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Objektkante (2)	17.42 (2,17)	< 0.01	0.672
HE Diskrepanz (6)	11.41 (10,180)	< 0.01	0.388
WW Objektkante x Diskrepanz	8.27 (10,180)	< 0.01	0.315
WW Position x Objektkante x Diskrepanz	3.72 (20,360)	< 0.01	0.171
WW Position x Objektkante	2.82 (4,72)	0.031	0.136
HE Position (3)	1.43 (4,72)	0.232	0.074
WW Position x Diskrepanz	1.33 (20,360)	0.157	0.069

Es zeigt sich außerdem eine Tendenz für eine höhere Genauigkeit, wenn Objektkanten im rechten Winkel exploriert werden. Auch die Ausprägungsstärke der Diskrepanz wird mit zunehmender Abweichung der haptischen von der visuellen Darstellung als höher beurteilt (s. Abbildung 8-14B), und dies markanter bei rechtwinkligen Objektkanten; der Trend bei spitzwinkligen Objektkanten ist eher gering.

In Tabelle 8-6 sind die Ergebnisse der MANOVA dargestellt: Sowohl Objektkante als auch Diskrepanz sowie die Interaktion beeinflussen beide Maße. Positionierung der inkongruenten Darstellung beeinflusst die Daten im Allgemeinen nicht; es wird jedoch die dreifache Interaktion signifikant. Da die Effektstärke als eher gering zu bezeichnen ist, wird der Effekt im Folgenden vernachlässigt.

Der Einfluss der Diskrepanz oberhalb und unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wird im Folgenden für die beiden abhängigen Variablen getrennt betrachtet.

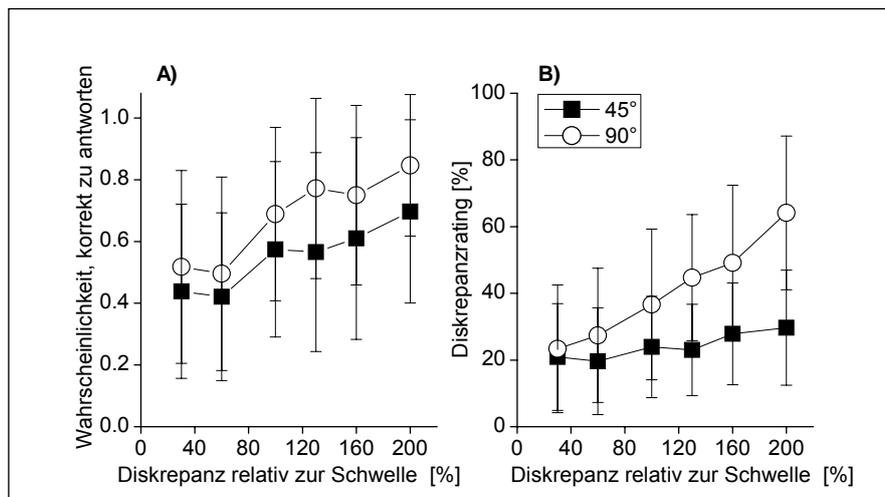


Abb. 8-14 Trefferrate (A) sowie die Einschätzung der wahrgenommenen Ausprägungsstärke der intermodalen Diskrepanz (B) abgetragen gegen die visuell-haptische Diskrepanz: Mit zunehmender Diskrepanz steigt die Wahrscheinlichkeit, korrekt zu antworten sowie die Einschätzung wahrgenommener Diskrepanz an.

Trefferrate. Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle beeinflussen weder die Art der Objektkante (45°, 90°) noch die Diskrepanz zwischen den Modalitäten die Wahrscheinlichkeit, richtig zu antworten (s. Tabelle 8-7A). Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle jedoch, ist die Trefferrate signifikant geringer, wenn spitze Objektkanten dargestellt werden. Außerdem ist die Trefferrate von der Diskrepanz abhängig (s. Tabelle 8-7B): Mit zunehmender Diskrepanz nimmt die Trefferrate linear zu ($F(1,18)=41.11$, $p<0.01$; $\eta^2=0.695$).

Tabelle 8-7 Die relevanten F-Statistiken der beiden ANOVAs mit Messwiederholung für die Trefferrate unterhalb und oberhalb der intermodalen Wahrnehmungsschwelle.

	A) Unterhalb (30, 60%)			B) Oberhalb (100-200%)		
	F-Wert (df)	p	η^2	F-Wert (df)	p	η^2
HE Objektkante	2.41 (1,18)	0.138	0.118	21.68 (1,18)	< 0.01	0.546
HE Diskrepanz	0.30 (1,18)	0.593	0.016	8.01 (2.6,48.7)*	< 0.01	0.308
WW Objektkante x Diskrepanz	0.00 (1,18)	0.953	0.000	1.04 (3,54)	0.381	0.055

Diskrepanzrating. Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wirkt sich eine Variation der intermodalen Diskrepanz nicht auf das Diskrepanzrating aus (s. Tabelle 8-8A). Ebenso wenig wird der Unterschied zwischen den beiden Objektkanten oder die Interaktion auf dem 1%-Signifikanzniveau bedeutsam.

Tabelle 8-8 Die relevanten F-Statistiken der beiden ANOVAs mit Messwiederholung für die Einschätzung wahrgenommener Diskrepanz unterhalb und oberhalb der intermodalen Wahrnehmungsschwelle.

	A) Unterhalb (30, 60%)			B) Oberhalb (100-200%)		
	F-Wert (df)	p	η^2	F-Wert (df)	p	η^2
HE Objektkante	5.66 (1,18)	0.029	0.239	43.73 (1,18)	< 0.01	0.708
HE Diskrepanz	0.99 (1,18)	0.334	0.052	24.50 (1,18,30.9)*	< 0.01	0.576
WW Objektkante x Diskrepanz	6.19 (1,18)	0.023	0.256	15.02 (3,54)	< 0.01	0.455

Oberhalb der Wahrnehmungsschwelle ist ebenfalls der stärkste Effekt der Unterschied zwischen den beiden Objektkanten (Diskrepanzen werden stärker bewertet bei Objektkanten mit rechtem Winkel) als auch der Einfluss der intermodalen Diskrepanz: Mit zunehmender Diskrepanz steigt die Bewertung der Diskrepanz linear an ($F(1,18)=32.23$, $p<0.01$; $\eta^2=0.642$). Die Wechselwirkung ist zusätzlich statistisch bedeutsam und lässt sich, wie in Abbildung 8-14B ersichtlich, auf einen besonders starken Anstieg mit zunehmender Diskrepanz zurückführen, wenn rechtwinklige Objektkanten exploriert werden.

8-2-2-3 Beeinflussung des Präsenzerlebens

In Abbildung 8-13 ist die Beurteilung der Präsenz für beide Standardreize dargestellt: Mit zunehmender intermodaler Diskrepanz nimmt das Präsenzerleben ab und dies v.a. bei der Darstellung rechtwinkliger Objektkanten. Kaum eine Abnahme lässt sich bei spitzen Objektkanten (45°) beobachten. In Tabelle 8-4 sind die F-Statistiken der ANOVA zusammengetragen.

Sowohl die Art der Objektkante (45° , 90°) als auch die intermodale Diskrepanz (30-200%) beeinflussen signifikant das Präsenzerleben. Wie schon in Abbildung 8-14 ersichtlich, ist das Präsenzerleben generell geringer bei der Darstellung von 90° bzw. höher für die Gruppe 45° . Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzerleben allgemein ab. Auch die Interaktion zwischen Objektkanten und Diskrepanz ist statistisch reliabel.

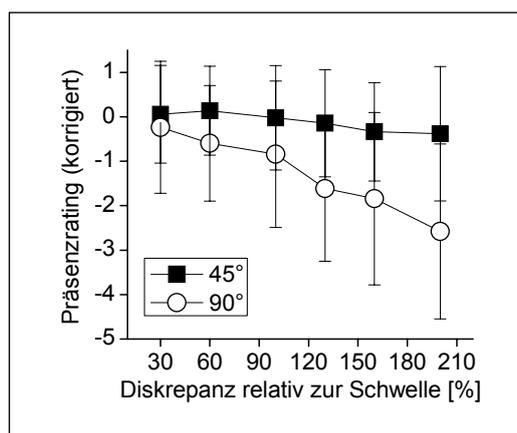


Abb. 8-13 Präsenzrating (am kongruenten Reiz relativiert) in Abhängigkeit der dargebotenen visuell-haptischen Diskrepanz: Mit zunehmender Diskrepanz nimmt das Präsenzerleben ab und dies besonders für Objektkanten mit rechtem Winkel.

Die Position der fehlerhaften Darstellung hingegen beeinflusst das Präsenzerleben nicht; die einzige signifikante Interaktion ist die dreifache Wechselwirkung, jedoch ist die Effektstärke ($\eta^2=0.123$) sehr gering, weshalb der Effekt zu vernachlässigen ist.

Tabelle 8-4 F-Statistiken der dreifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung. Mit (*) gekennzeichnete Werte wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

	F-Wert (df)	p	η^2
HE Objektkante (2)	18.78 (1,18)	< 0.01	0.511
HE Diskrepanz (6)	17.51 (2.4,42.5)*	< 0.01	0.493
WW Objektkante x Diskrepanz	12.73 (3.1,55.9)*	< 0.01	0.414
WW Position x Objektkante x Diskrepanz	2.51 (10,180)	< 0.01	0.123
WW Position x Diskrepanz	1.09 (5.2,94.3)*	0.370	0.057
HE Position (3)	0.14 (2,36)	0.868	0.008
WW Position x Objektkante	0.07 (1.6,28.7)*	0.890	0.004

Um die Hypothesen testen zu können, werden zwei getrennte ANOVAs für Diskrepanzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle (30, 60%) sowie oberhalb, einschließlich der Wahrnehmungsschwelle (100-200%), und dem Faktor Objektkante (45°, 90°) berechnet³³; die Effekte sind in Tabelle 8-5 zusammengestellt.

Tabelle 8-5 Die relevanten F-Statistiken der beiden ANOVAs mit Messwiederholung für das Präsenzerleben unterhalb und oberhalb der intermodalen Wahrnehmungsschwelle.

	A) Unterhalb (30, 60%)			B) Oberhalb (100-200%)		
	F-Wert (df)	p	η^2	F-Wert (df)	p	η^2
HE Objektkante	4.91 (1,18)	0.040	0.214	22.31 (1,18)	< 0.01	0.553
HE Diskrepanz	1.09 (1,18)	0.309	0.057	14.75 (3,54)	< 0.01	0.450
WW Objektkante x Diskrepanz	12.5 (81,18)	< 0.01	0.411	9.17 (3,54)	< 0.01	0.337

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle wird der Einfluss der Art der Objektkante nicht statistisch signifikant (s. Tabelle 8-5A). Der einzig effektstarke Einfluss auf das Präsenzerleben unterhalb der Detektionsschwelle für intermodale Diskrepanzen ist die Interaktion zwischen Objektkante und Diskrepanz: Besonders bei einer intermodalen Diskrepanz von 60% ist der Unterschied im Präsenzrating zwischen den beiden Objektkanten markant (s. Abbildung 8-14).

Diskrepanz beeinflusst das Präsenzempfinden nur oberhalb der Wahrnehmungsschwelle (s. Tabelle 8-5B): Wie in Abbildung 8-14 erkennbar, nimmt mit zunehmender Diskrepanz oberhalb der intermodalen Schwelle das Präsenzerleben signifikant ab ($F(1,18)=24.06$, $p<0.01$; $\eta^2=0.572$). Dieser Trend wiederum ist abhängig von der Art der Objektkante: Im Allgemeinen ist das Präsenzempfinden höher bei spitzen Kanten (HE Objektkante) und zeigt eine stärkere Abnahme bei Objektkanten im rechten Winkel (WW Objektkante x Diskrepanz).

³³ Da Position zwar keine Rolle spielte, jedoch zumindest zu einer signifikanten, wenn auch effektschwachen, Interaktion führte, wurde der Faktor als Kontrollfaktor weiter hinzugenommen.

8-2-3 Diskussion

Der Einfluss zunehmender intermodaler Diskrepanz wurde in Abhängigkeit der Schwelle für visuell-haptische Diskrepanzen untersucht. Es war angenommen worden, dass Diskrepanzen unterhalb der Schwelle weder das Präsenzerleben noch die Performanz (Trefferate) oder das Diskrepanzrating beeinflussen sollten, während oberhalb der intermodalen Wahrnehmungsschwelle eine lineare Abnahme des Präsenzerlebens (Hypothese XIV-1) bzw. Zunahme der Trefferrate sowie des Diskrepanzratings (Hypothese XIV-2) erwartet wurde. Die Ergebnisse bestätigen diese Hypothesen (s. Tabelle 8-10): Je stärker ausgeprägt die Abweichung zwischen visueller und haptischer Darstellung ist, desto geringer bewerteten die Probanden ihr Präsenzerleben. Zusätzlich gilt, mit zunehmender intermodaler Diskrepanz erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, die fehlerhafte Darstellung korrekt zu identifizieren und das Ausmaß der Diskrepanz wird korrekt als stärker beurteilt.

Zusätzlich war erwartet worden (s. Tabelle 8-10), dass auch die Art der Objektkante die Trefferrate sowie das Diskrepanzrating beeinflussen sollte. In Abschnitt 7-2 (wie auch im haptischen Fall in Abschnitt 4-3) wurde bereits nachgewiesen, dass der sog. Oblique-Effekt einen Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle hat; in Abschnitt 5-2 war darüber hinaus gezeigt worden, dass er auch die verbale Neigungseinschätzung beeinflusst. Diese Ergebnisse können um einen Einfluss bei inkongruenter visuell-haptischer Darstellung erweitert werden: Eine Beeinträchtigung des Präsenzerlebens, eine erleichterte Einschätzung der dargestellten Diskrepanz sowie ein Anstieg in der Wahrscheinlichkeit, die inkongruente Darstellung korrekt zu identifizieren, war bei der Darstellung rechtwinkliger Objektkanten markanter gegeben als bei spitzen Objektkanten.

Darüber hinaus verstärkte sich der Oblique-Effekt mit zunehmender intermodaler Diskrepanz: Besonders für rechtwinklige Objektkanten ließ sich eine stärkere Abnahme des Präsenzerlebens mit zunehmender Diskrepanz beobachten, während gleichzeitig die wahrgenommene Stärke der Diskrepanz für rechtwinklige Objektkanten linear anstieg.

Tabelle 8-10 Zusammenfassung der Hypothesen und der Ergebnisse für den Experimentblock XIV „Wahrnehmung inkongruenter Darstellung von Objektkanten“.

Hypothesen	Ergebnis	Stärke des Effekts
XIV-1 Mit zunehmender Diskrepanz oberhalb der visuell-haptischen Wahrnehmungsschwelle nimmt das Präsenzerleben ab, die Einschätzung wahrgenommener Diskrepanz sowie die Trefferrate zu.	bestätigt	$\eta^2=0.57$ (Präsenzerleben) $\eta^2=0.70$ (Trefferate) $\eta^2=0.64$ (Diskrepanzrating)
XIV-2 Die Art der Objektkante beeinflusst die Trefferrate und das Diskrepanzrating: Die Performanz sollte bei spitzen Objektkanten unterlegen sein. Auch das Präsenzerleben sollte beeinflusst werden.	bestätigt	Oberhalb der Schwelle: $\eta^2=0.55$ (Präsenzerleben) $\eta^2=0.55$ (Trefferate) $\eta^2=0.71$ (Diskrepanzrating)

Wie schon zuvor in Abschnitt 8-1 konnte auch für die Wahrnehmung bimodaler Diskrepanzen bei der Darstellung von Objektkanten bestätigt werden, dass sich Inkongruenzen oberhalb der intermodalen Wahrnehmungsschwelle in der Darstellung beeinträchtigend auf das Präsenzerleben auswirken (vgl. IJsselstein et al., 2000; Mantovani & Riva, 1999; Witmer & Singer, 1998). Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle jedoch wirken sich Inkongruenzen weder auf die Performanz noch auf das Präsenzerleben beeinträchtigend aus: Geringe visuell-haptische Abweichungen können demzufolge tolerierbar sein, solange sie die Detektionsschwelle nicht überschreiten.

8-3 Zusammenfassung

Ob tatsächlich eine „perfekte“, d.h. fehlerfreie simultane Darstellung aller Modalitäten zur Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit und Objektkanten nötig ist, war zentrale Fragestellung dieses Kapitels. Gerade bei der Interaktion mit bzw. innerhalb virtueller, aber auch realer, telepräsenster Umgebungen ist von Interesse, inwiefern intermodale Inkongruenzen Aufgabenleistung und Präsenzerleben beeinflussen, oder ob die Möglichkeit besteht, sensorische Daten komprimiert und reduziert zu kodieren. Präsenzerleben erfasst dabei, wie in Kapitel 1 beschrieben, u.a. auch die wahrgenommene Qualität der Darstellung. Demzufolge war erwartet worden, dass (oberhalb der Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz) wahrnehmbare Abweichungen in der Darstellung das Präsenzerleben beeinträchtigen oder irritieren. Dies konnte eindeutig sowohl für Objektnachgiebigkeit als auch für Objektkanten nachgewiesen werden.

Darüber hinaus zeigte sich, dass sich mit zunehmender Diskrepanz zwischen den Modalitäten die Wahrnehmbarkeit der Konflikte erhöht. Dies erleichtert die Trennbarkeit der einzelnen Modalitäten mit zunehmender Diskrepanz und resultiert in einer abnehmenden Verzerrung in der Beurteilung der einzelnen Modalitäten, so beispielsweise bezüglich der Nachgiebigkeit. Zusätzlich erhöht sich bei höheren intermodalen Diskrepanzen die Wahrscheinlichkeit, die fehlerhafte Darstellung zu detektieren.

Unterhalb der Wahrnehmungsschwelle für intermodale Diskrepanzen, wird zwar tendenziell ein leichter Konflikt wahrgenommen und beurteilt (vgl. Soto-Faraco et al., 2002; Marks, 2004), er resultiert jedoch nicht in einer Beeinträchtigung des Präsenzerlebens beim Explorieren von Objektnachgiebigkeit oder -kanten. Auch die Wahrnehmung der Nachgiebigkeit bleibt von der perzeptuell kongruenten Darstellung unbeeinflusst.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass intermodale Diskrepanzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle tolerierbar sind.

9 ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG UND FORSCHUNGSAUSBLICK

Vor dem Hintergrund multimodaler Displays zukünftiger TPTA-Systeme wurde in dieser Arbeit die unimodal haptische und bimodale visuell-haptische Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen beim Explorieren unterschiedlicher Materialproben untersucht und das menschliche Auflösungsvermögen in Abhängigkeit der Variation physikalischer Parameter bestimmt. Hierzu waren als relevante Materialeigenschaften Textur, bzw. Körnigkeit, und Härte, bzw. Nachgiebigkeit, sowie als bestimmende geometrische Eigenschaft, die Objektkante, ausgewählt worden. Bei den eingangs gestellten Fragen kam die Untersuchung dabei zu den im Folgenden kurz noch einmal zusammengefassten Ergebnissen:

Teil 1 – Menschliches Auflösungsvermögen und Datenreduktion

Wie gut können Menschen Oberflächentextur, Objektnachgiebigkeit und Objektkanten diskriminieren?

Das Auflösungsvermögen der genannten Objektparameter lässt sich wie folgt anhand der empirisch ermittelten Weber-Brüche (bzw. JND-%) quantifizieren:

- Oberflächentextur: Das Auflösungsvermögen von Texturen hängt von der räumlichen Periode der Textur ab. Ungefähr 15% Unterschiede in der räumlichen Periode von Makrotexturen können diskriminiert werden, während 15-35% Unterschiede bei Mikrotexturen nötig sind.
- Objektnachgiebigkeit: Haptisch können Menschen 20-30% Unterschiede bezüglich der Nachgiebigkeit real explorierter, aber auch über ein HSI dargestellter Würfelobjekte diskriminieren. Dabei spielt die Standardnachgiebigkeit weitestgehend eine untergeordnete Rolle, d.h. das Auflösungsvermögen ist über einen breiten Stimulusbereich vergleichbar.
- Objektkanten: Spitze Objektkanten konnten (in allen Modalitäten) schlechter aufgelöst werden als rechtwinklige. Haptisch sind 20% bzw. 10% Unterschiede beim Explorieren realer oder über ein HSI dargestellter Objektkanten durch Entlangfahren an der Kante wahrnehmbar.

Die ermittelten Weber-Brüche (bzw. JND-%) können demzufolge als Grundlage für eine haptische Datenreduktion herangezogen werden.

Wie beeinflussen externe Faktoren wie die Fingertemperatur und Explorationsbewegungen das haptische Auflösungsvermögen?

Fingertemperatur führte zu einer Beeinträchtigung des haptischen Auflösungsvermögens von Oberflächentextur in Abhängigkeit der räumlichen Periode: Die Unterscheidungsfähigkeit war besonders bei Mikrotexturen, nicht jedoch bei Makrotexturen, beeinträchtigt. Ein Einfluss auf das Auflösungsvermögen von Objektnachgiebigkeit konnte nicht nachgewiesen werden: Die Probanden kompensierten die verringerte Sensitivität ihrer Fingerspitzen durch eine signifikant erhöhte Kraftaufwendung.

Die für das Explorieren der Objektparameter als adäquat klassifizierte Explorationsbewegungen (Seitliche Bewegung bei Textur, Ausüben von Druck bei Nachgiebigkeit) zeigten eine Überlegenheit gegenüber anderen möglichen Bewegungen (Ausüben von Druck bei Textur, Greifen bei Nachgiebigkeit). Darüber hinaus ließ sich keine Überlegenheit zusätzlich taktiler Informationen beim Explorieren von Objektkanten durch Entlangfahren an der Kante finden, d.h. rein propriozeptive Informationen sind hierfür ausreichend.

Um den Mensch beim Arbeiten innerhalb eines Mensch-Roboter-Systems zu unterstützen, ist darauf zu achten, ob die Aufgabenausführung eine hohe Präzision verlangt. In diesem Fall bietet sich eine Gestaltung der Schnittstelle an, die das Explorieren der Objektparameter anhand der adäquaten Explorationsmethoden, klassifiziert von Lederman & Klatzky (1987), erlaubt.

Teil 2 – Intrahaptische Integration: Darbietung zusätzlicher Information

Wie verändert gleichzeitige Darbietung von mehr als einer Objekteigenschaft ihre gegenseitige Empfindungsstärke?

So genannte thermische Intensivierung, d.h. eine Verstärkung der Wahrnehmung von Objektnachgiebigkeit oder Oberflächenkörnung bei zusätzlicher Veränderung der Objekttemperatur, konnte nicht bestätigt werden.

Objektnachgiebigkeit und Oberflächenkörnung hingegen beeinflussten bidirektional ihre gegenseitige Empfindungsstärke: Harte Objekte werden als weniger gekörnt und weiche Objekte als gekörnter eingeschätzt. Umgekehrt werden glatte Oberflächen als nachgiebiger, und texturierte Oberflächen als weniger nachgiebig eingeschätzt. Insbesondere der Einfluss zusätzlicher Oberflächenkörnung auf die Wahrnehmung der Objektnachgiebigkeit erwies sich als stabil.

Wie verändert eine Erhöhung der haptischen Information bei der Darstellung von Oberflächenneigung deren Wahrnehmung?

Zusätzliches Kraftfeedback über das CyberGrasp Exoskelett ist der alleinigen vibrotaktilen Rückmeldung bei dem zur Untersuchung von Oberflächenneigung über drei Finger konstruierten haptischen Interface nicht überlegen. Es zeichnet sich sogar eher eine erhöhte Ungenauigkeit in der Wahrnehmung von Oberflächenneigung ab. Auch führt das Erhöhen der Informationsmenge und somit das Hinzufügen von Kraftfeedback zu vibrotaktilen Feedback nicht zu einem erhöhten Präsenzerleben und damit zu einer verbesserten Bewertung der Qualität der Schnittstelle. Für eine Umsetzung von Oberflächenneigung über das vorgestellte SlantDevice ist eine zusätzliche Kraftinformation nicht zu empfehlen.

Teil 3 – Intermodale Integration: Integrationsgrenzen und sensorische Dominanz

Führt bimodale gegenüber unimodaler Darbietung zu einem überlegenen menschlichen Auflösungsvermögen der physikalischen Parameter?

Dominiert eine (evtl. die visuelle) Modalität die bimodale Wahrnehmung?

Bei visuell-haptischer Darstellung können Unterschiede in der Objektnachgiebigkeit von mehr als 30% unterschieden werden. Das bimodale Auflösungsvermögen von Objektkanten hängt erneut von der Winkelgröße ab: Unterschiede bezüglich spitzwinkliger Objektkanten konnten schlechter diskriminiert werden (5%) als rechtwinklige Objektkanten (2%).

Bimodale, visuell-haptische Darstellung sowohl von Objektnachgiebigkeit als auch von Objektkanten führte nicht zu einem verbesserten Auflösungsvermögen der beiden physikalischen Parameter im Gegensatz zur jeweils besten unimodalen Darstellung (Haptik bei Objektnachgiebigkeit, Sicht bei Objektkanten). Nichts desto trotz kann nicht argumentiert werden, dass eine unimodale Darstellung besser ist als eine bimodale: Bereits in der Literatur wurde nachgewiesen, dass die Quantität der zurückgemeldeten Information sich positiv auf den für die Gestaltung von TPTA-Systemen relevanten Faktor, das Präsenzerleben, auswirkt. Darüber hinaus unterstützt redundante Information die Wahrnehmung und erleichtert die Aufgabendurchführung.

Wo liegt die Grenze zwischen perzeptueller Kongruenz und detektierbarem intermodalem Konflikt bei bimodaler Wahrnehmung?

Die Toleranzgrenze für intermodale Abweichungen ist, wie sowohl für Objektnachgiebigkeit als auch für Objektkanten gezeigt werden konnte, abhängig von der Referenzmodalität: Durchweg größere Konflikte wurden toleriert, wenn Inkongruenzen in der haptischen Darstellung (von der visuellen Referenz) detektiert werden sollten.

Die Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz liegt bei Objektnachgiebigkeit bei teilweise bis zu 85% intermodaler Abweichung, während sie bei Objektkanten erneut abhängig von der Winkelgröße ist. Bis zu 50% vs. 30% Ungenauigkeit in der haptischen Umsetzung von Objektkanten (spitz bzw. rechteckig) werden als perzeptuell kongruent wahrgenommen.

Die ermittelten Weber-Brüche können als Grundlage für eine Datenreduktion zwischen den Modalitäten herangezogen werden.

Teil 4 – Bimodale Inkongruenzen: Wahrnehmung und Einfluss auf die Performanz

Beeinflussen Abweichungen in der visuell-haptischen Darstellung Präsenzerleben und Aufgabenleistung in Abhängigkeit der Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz?

Treten Abweichungen bei der visuell-haptischen Darstellung zwischen den Modalitäten auf und liegen diese Inkongruenzen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle und können somit als perzeptuell kongruent bezeichnet werden (s. Marks, 2004), so führen diese Ungenauigkeiten der Darstellung weder zu einer Beeinträchtigung des Präsenzerlebens noch zu einer Beeinflussung der Wahrnehmung. Dies gilt sowohl für Objektnachgiebigkeit als auch für Objektkanten.

In der Beantwortung der Fragen eröffnen sich neue Gesichtspunkte für die Gestaltung rein haptischer und visuell-haptischer TPTA-Systeme, sowie neue Erkenntnisse zur Grundlagenforschung über die menschliche Wahrnehmung.

Bisher noch ungeklärt ist in diesem Zusammenhang, ob sich eine erlaubte visuell-haptische Inkongruenz auch unterhalb der Schwelle für perzeptuelle Inkongruenz auf die Aufgabenleistung innerhalb eines TPTA-Systems auswirkt. Gerade dort, wo nämlich eine hohe Genauigkeit bei der Aufgabenausführung erforderlich ist, wie beispielsweise in der Mikromontage, könnten sich derartige Diskrepanzen negativ auf die Aufgabenleistung auswirken (s. Pongrac et al., 2006). Für andere Anwendungsbereiche, wie beispielsweise das Edutainment, die ohne hohe Anforderungen an diese Genauigkeit auskommen, gilt dies nicht. Diese können vielmehr von einer entsprechenden Datenreduktion profitieren, da dadurch die Verarbeitung der Daten auf technischer Ebene erleichtert wird, was sich nicht nur in einer leichteren Bedienbarkeit, in Kostenersparnis und in geringer geforderter Speicherkapazität niederschlägt.

Eine weitere derzeit noch ungeklärte Frage ist, inwiefern sich das Kombinieren von wahrnehmungsbasierter Kompression auf Präsenzerleben und Aufgabenleistung auswirkt. Erste Ansätze zur Untersuchung wurden bereits unternommen (s. Schulz, 2006; Pongrac, in Vorbereitung). Dabei blieb jedoch bisher unberücksichtigt, inwiefern eine Kombination von mehr als einem Kompressionsverfahren Präsenzerleben und Aufgabenleistung beeinflusst. Dies ist besonders im Hinblick auf eine Implementierung von psychophysischen Datenreduktionsverfahren in TPTA-Systemen relevant, wenn neben einem Eindruck von Wirklichkeitsnähe präzises Arbeiten verlangt ist.

Der oben dargestellte Ansatz lässt sich auch auf systemlatenzbedingte Verzögerungen in der Darstellung zwischen den Modalitäten erweitern, d.h. inwiefern Zeitverzögerungen zwischen Sicht und Haptik (oder umgekehrt) innerhalb des temporalen Integrationsfensters, Aufgabenleistung und Präsenzerleben des Benutzers beeinträchtigen können. Erste Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 453 „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ als Fortführung der hier vorliegenden Arbeit und der Dissertation von Martin Kuschel (in preparation) an der Technischen Universität München bereits begonnen (Teilprojekt M9).

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ANOVA	<i>engl. Analysis of variance</i> Varianzanalyse
d'	Index der Detektabilität, auch als Sensitivität bezeichnet
DL	Differenz Limen Auch bezeichnet als Unterschiedsschwelle oder <i>engl. just noticeable difference</i> JND. Bezeichnet den kleinsten Unterschied zweier Reize, der erforderlich ist, um den Unterschied wahrnehmen zu können
HSI	<i>engl. Human System Interface</i> Bezeichnet die Mensch-Maschine-Schnittstelle bestehend in der Regel aus einem visuellen Ausgabegerät (z.B. Bildschirm) sowie haptischen Ein-/Ausgabegerät (z.B. PHANTOM® Device, CyberGrasp Exoskelett, Vibrationsmotoren).
IES	Interelement-spacing Partikel- bzw. Rillenabstand bei Texturen
JND-%	Von <i>engl. Just Noticeable Difference</i> JND Auch bezeichnet als <i>Weber-Bruch</i> oder <i>Weber-Konstante</i> . Entspricht dem am Standardreiz relativierten minimal spürbaren Reizunterschied (s. <i>DL</i>)
MANOVA	Multivariate ANOVA, d.h. es wird mehr als eine abhängige Variable berücksichtigt
ME	Magnitude Estimation (s. Abschnitt 3-3)
MW	Mittelwert
PSE	<i>engl. Point of Subjective Equality</i> Entspricht dem Punkt der psychometrischen Funktion, bei dem in 50% der Fälle eine Reizpräsentation (Absolutschwellerhebung) oder ein Vergleichsreiz als größer (Unterschiedsschwellerhebung) wahrgenommen werden kann
RL	Reiz Limen Auch bezeichnet als Absolutschwelle. Bezeichnet die kleinste Menge an Reizintensität, die nötig ist, um eine Empfindung hervorzurufen
sd	Standardabweichung

GLOSSAR

afferent		<i>lat.</i> affere, hintragen / zuführen bezeichnet die von der Peripherie (z.B. den Rezeptoren) kommenden, zum zentralen Nervensystem laufenden Nervenfasern
efferent		<i>lat.</i> efferre, wegtragen bezeichnet die vom zentralen Nervensystem zur Peripherie laufenden Nervenfasern
Habituation		Gewöhnung an einen Reiz ohne Adaptation
Haptische Wahrnehmung	Wahrnehmung	<i>griech.</i> haptikos, greifbar die durch Interaktion bzw. bei Kontakt mit Objekten entstehende Wahrnehmung; sie lässt sich untergliedern in <i>taktile</i> und das <i>propriozeptive</i> Wahrnehmung
intramodal		innerhalb einer Modalität, z.B. Vergleich von haptischen Submodalitäten, wie thermischer und mechanischer Qualität
intermodal		zwischen Modalität, z.B. Vergleich zwischen der visuellen und haptischen Modalität
kinästhetisch		<i>griech.</i> kineîn, bewegen; aîsthêsis, Empfindung ein oft zu <i>propriozeptiv</i> austauschbar verwendeter Begriff
Nozizeption		<i>lat.</i> nocere, schaden Wahrnehmung von Schmerzreizen
Perseverationstendenz		Antworttendenz, die z.B. Ja-Sage- oder Nein-Sage-Verhalten der Probanden bezeichnet
propriozeptive Wahrnehmung	Wahrnehmung	<i>lat.</i> proprius, eigen; recipere, aufnehmen durch Kraftaufwendung, Bewegung und Stellung der Gliedmaßen vermittelte Wahrnehmung
Referenzmodalität		Entspricht der Modalität, die den Standardreiz präsentiert und als Basis, d.h. als Referenz, dient, um im Vergleich zu ihr den Unterschied zu einer zusätzlich dargebotenen (Vergleichs-) Modalität zu finden, der eben noch spürbar ist.
Reiz		<i>oder.</i> Stimulus Entspricht physikalischen Gegebenheiten, die in diskreten oder stetigen Einheiten über in der Regel eine physikalischen Dimension definiert sind
Standardreiz		Entspricht dem Reizwert der als Basis, d.h. als Standard, dargeboten und mit (Vergleichs-) Reizen ober- und unterhalb seiner physikalischen Dimension verglichen wird, um den minimalen Unterschied (s. <i>DL</i>) ermitteln zu können.
Stimulus		s. <i>Reiz</i>
taktile Wahrnehmung		<i>lat.</i> tactio, Berührung durch Berührung der Haut vermittelte Wahrnehmung
Trial		Reizpräsentationsfolge, nach der eine Antwort des Probanden erforderlich wird

ANHANG

A) Berechnung der Räumlichen Periode für Schleifpapier (s. Abschnitt 4-1)

Quelle: URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/>

A1) Auszug aus Suchbegriff „Schleifpapier“

Körnung

Schleifpapier oder Schleifgewebe sind in verschiedenen Körnungen erhältlich. Die Zahl der Körnung, die in der Regel auf der Rückseite angegeben ist, orientiert sich an der Maßeinheit [Mesh](#), der Anzahl der Maschen eines Siebes pro Zoll (25,4 mm). Je größer die Zahl, desto feiner die Körnung. Überschlagsmäßig gilt für die Korngröße: Korngröße in mm = 25,4 / Körnung.

Körnungen und Verwendung			
Körnung		Korngröße in µm	Verwendung
grob	6-30	> 600	Entfernen von Leim- und Farbschichten
mittel	36-80	538-201	Grobes Vorschleifen roher Holzflächen
fein	100-180	162-82	Feinschleifen roher Holzflächen
sehr fein	220-1000	68-18	Nachschleifen gewässerter, grundierter und lackierter Flächen

Die Korngröße und die damit verbundene Tätigkeit sind abhängig von der jeweiligen Anwendung (z.B. Werkstoff, Maschine, Ausgangsoberfläche, angestrebte Oberfläche) und auch den Gewohnheiten der Anwender. Hier gibt es auch starke regionale Unterschiede in den Bearbeitungsschritten.

A2) Suchbegriff „Mesh“

Das Mesh ist eine Einheit der Maschenweite in vielen englischsprachigen Ländern (siehe [Angloamerikanisches Maßsystem](#)) und wird hauptsächlich für Siebe angewendet. Gleichzeitig bezeichnet das Mesh auch die [Korngröße](#) von entsprechend gesiebttem Material.

Das englische Wort bedeutet *Masche*. Einen Wert von 5 mesh hat ein Sieb mit fünf Maschen pro Zoll (25,4 mm). Da noch die Dicke der Maschendrahte zu berücksichtigen ist, entsprechen 5 mesh allerdings nicht einer Korngröße von einem Fünftel Zoll (5,1 mm), sondern einer von 4,0 mm (also 78% von 1/5 Zoll). Einer Korngröße von 10 mesh entspricht ein Korndurchmesser von 2,0 mm. Bei großen Mesh-Zahlen gibt es erhebliche Abweichungen zwischen den Korngrößen je nach zugrunde gelegter Norm. So entsprechen 100 mesh (eine Masche nach jeweils 0,254 mm) zwar häufig einer Korngröße von 0,149-0,150 mm (59%), können aber auch je nach Zweck, Behörde und Land zum Beispiel mit 0,162 mm (64%, FEPA-Norm P100 für [Schleifpapiere](#)), 0,129 mm (51%, FEPA-Norm F100 für Schleifkörper) oder 0,125 mm (49%, J100 nach der japanischen Norm JIS R6001) festgelegt sein. [Schleif-](#)

mittel mit Korngrößen um 0,013 mm sind gar den am Mesh orientierten Bezeichnungen P1500 (77%), F600 (31%) und J1200 (61%) zugeordnet. Die Anzahl der Maschen pro Zoll variiert hier schon fast um den Faktor 3. Ein Vergleich ohne entsprechende Tabelle oder genaue Kenntnis der jeweiligen Normen ist dann nicht mehr möglich. Nimmt man einen Fehler von maximal 25% in Kauf, dann können die Korngrößen zwischen 5 und 100 mesh jedoch mit 16,2 mm geteilt durch den Mesh-Wert gut abgeschätzt werden.

Bei netzartigen Geweben, zum Beispiel bei Moskitonetzen, wird oft auch die Anzahl der Öffnungen pro Fläche in Mesh pro Quadratzoll angegeben, also nicht als reziproke Länge, sondern als reziproke Fläche.

A3) Berechnung der räumlichen Periode für selbst hergestelltes gekörntes Papier

Zur Herstellung wurde herkömmlicher Aquarienkies mit einer durchschnittlichen Korngröße von 0.15-0.2 mm verwendet. Die Körner wurden als Kornmenge in Kubikzentimeter abgemessen und gleichmäßig auf der 9 x 9.5 cm Fläche verteilt. Die Kornanzahl wurde auf 10 mm 10mal gemessen.

Kornmenge [cm ³]	mittlere Kornanzahl auf 10 mm	Räumliche Periode [mm]
7	7.25	1.38
6	7.00	1.43
5	6.50	1.54
4	6.25	1.60
3	5.50	1.82
2	4.75	2.11
1	4.50	2.22

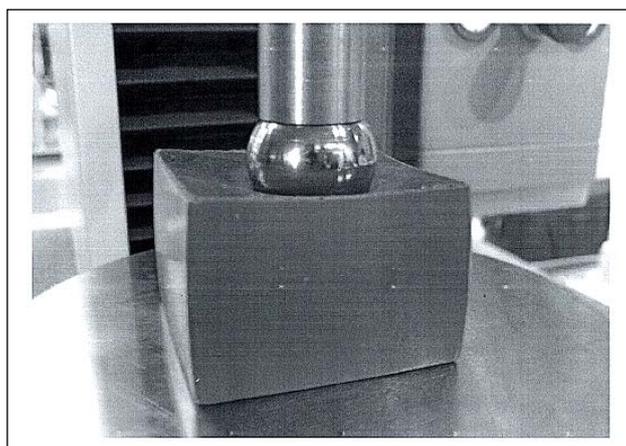
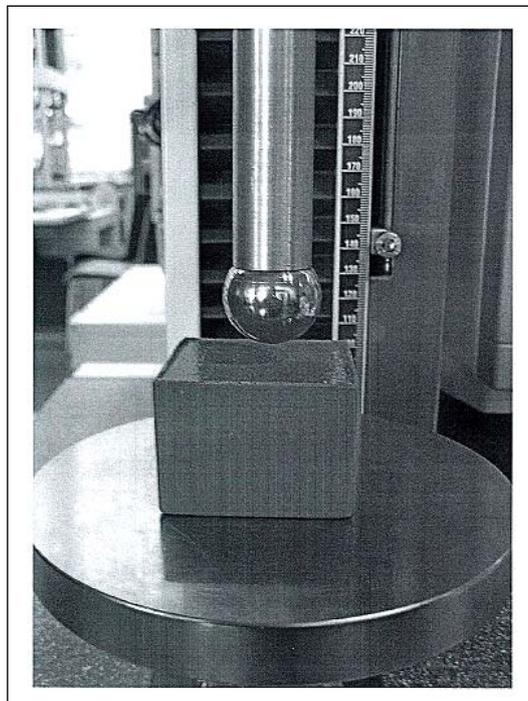
B) Herstellung der Silikonproben (s. Abschnitt 4-2)

B1) Bestimmung der Nachgiebigkeit der Silikonproben

Zur Herstellung der Silikonproben wurden die folgenden Materialien von der Firma Wacker (Drawin Vertriebs-GmbH, Rudolf-Diesel-Straße 15, 85521 Ottobrunn) verwendet:

- Elastosil® M4511 (Shore A von 12) sowie der dazugehörige Härter T56
- Elastosil® M4470 (Shore A von 60) sowie der dazugehörige Härter T40
- Silikonöl AK35

Gemessen wurde durch die Firma Zwick / Roell die Kraft, die durch einen Probekörper (Kugeldurchmesser 25.4 mm) aufgewendet werden musste, um bei einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min um 20 mm in den Würfel eindringen zu können.



B2) Herstellung der Silikonproben ohne Textur (s. Abschnitt 4-2-3)

Legende:

- S60 Shore Härte A60 (and Elastosil® M4470, Wacker Silicones)
 S20 Shore Härte A12 (Elastosil® M4511, Wacker Silicones)

RANG	F bei 20mm	MM/N	GRUNDSUBSTANZ	ÖL [GEW%]
	2165.33	0.009	S60	0%
	1324.27	0.015	S60	10%
1	1095.84	0.018	S60	20%
2	759.8	0.026	$\frac{2}{3}$ S60+ $\frac{1}{3}$ S12	90%
3	695.2	0.029	$\frac{2}{3}$ S60+ $\frac{1}{3}$ S12	100%
4	396.6	0.050	$\frac{2}{3}$ S60+ $\frac{1}{3}$ S12	80%
5	344.6	0.058	$\frac{2}{3}$ S12+ $\frac{1}{3}$ S60	100%
6	309.4	0.065	$\frac{2}{3}$ S12+ $\frac{1}{3}$ S60	90%
7	273.7	0.073	$\frac{2}{3}$ S12+ $\frac{1}{3}$ S60	80%
8	184.7	0.108	$\frac{2}{3}$ S60+ $\frac{1}{3}$ S12	50%
9	171.2	0.117	$\frac{2}{3}$ S60+ $\frac{1}{3}$ S12	60%
10	138.9	0.144	$\frac{2}{3}$ S12+ $\frac{1}{3}$ S60	60%
11	126.7	0.158	$\frac{2}{3}$ S12+ $\frac{1}{3}$ S60	50%
12	85.7	0.233	S12	10%
13	78.8	0.254	S12	23%
14	74.0	0.270	S12	27%
15	60.9	0.328	$\frac{1}{3}$ S60+ $\frac{2}{3}$ S12	50%
16	54.8	0.365	S12	30%
17	49.3	0.406	S12	33%
18	39.6	0.505	S12	30%
19	34.9	0.573	S12	37%
20	33.0	0.606	S12	33%
21	27.0	0.741	S12	42%
22	24.2	0.826	S12	40%
23	22.2	0.901	S12	37%
24	18.3	1.093	S12	45%
25	12.2	1.639	S12	48%
26	11.7	1.709	S12	50%
27	10.1	1.980	S12	50%
28	8.4	2.381	S12	50%

B3) Kontrolle der Fingertemperatur in der Stichprobe (s. Abschnitt 4-2-3)

Gruppenfaktoren		Fingertemperatur		
Explorationsmethode	Fingertemperatur	Baseline	vor Testung	nach Testung
Ausüben von Druck	20 °C	26 °C	22 °C	22 °C
	32 °C	27 °C	32 °C	32 °C
	37 °C	26 °C	35 °C	34 °C
Greifen	20 °C	29 °C	20 °C	20 °C
	32 °C	29 °C	32 °C	32 °C
	37 °C	26 °C	33 °C	35 °C

B4) Herstellung der Silikonproben mit und ohne Textur (s. Abschnitt 4-2-4)

Legende:

- S60 Shore Härte A60 (and Elastosil® M4470, Wacker Silicones)
 S20 Shore Härte A12 (Elastosil® M4511, Wacker Silicones)

RANG	F bei 20 mm	MM/N	GRUNDSUBSTANZ	ÖL [GEW%]
1	1615.52	0.012	S60	0%
2	1180.06	0.017	S60	5%
3	963.68	0.021	S60	10%
4	730.96	0.027	S60	15%
5	514.27	0.039	S60	20%
6	434.39	0.046	S60	25%
7	336.87	0.059	S60	30%
8	181.83	0.110	S12	0%
9	125.67	0.159	2/3S60+1/3S12	50%
10	97.83	0.204	S12	10%
11	92.25	0.217	2/3S60+1/3S12	60%
12	80.1	0.250	2/3S60+1/3S12	70%
13	71.14	0.281	S12	20%
14	69.18	0.289	S12	23%
15	67.57	0.296	S12	5%
16	61.54	0.325	2/3S60+1/3S12	80%
17	59.75	0.335	S12	27%
18	56.25	0.356	S12	30%
19	45.77	0.437	2/3S60+1/3S12	100%
20	45.14	0.443	S12	37%
21	39.71	0.504	S12	40%
22	37.68	0.531	S12	33%
23	35.63	0.561	S12	50%
24	31.49	0.635	S12	45%
25	27.45	0.729	2/3S12+1/3S60	70%
26	25.77	0.776	2/3S12+1/3S60	60%
27	23.68	0.845	S12	48%
28	22.44	0.891	S12	42%
29	15.87	1.260	2/3S12+1/3S60	90%
30	15.16	1.319	2/3S12+1/3S60	80%
31	13.63	1.467	2/3S12+1/3S60	100%

C) Intrahaptische Illusionen: Nicht berichtete Ergebnisse (s. Abschnitt 5-1)

Interaktionen:	F (df)	p	η^2
Fokus x Härte	0.82 (9,252)	0.597	0.028
Fokus x Härte x Exploration	0.64 (9,252)	0.760	0.022
Fokus x Härte x Temperatur	1.02 (18,504)	0.430	0.035
Fokus x Härte x Temperatur x Exploration	1.38 (18,504)	0.137	0.047
Fokus x Temperatur	2.42 (18,504)	0.001	0.079
Fokus x Temperatur x Exploration	0.71 (18,504)	0.802	0.025
Fokus x Textur	1.65 (9,252)	0.102	0.056
Fokus x Textur x Exploration	1.05 (9,252)	0.403	0.036
Fokus x Textur x Härte	0.97 (9,252)	0.462	0.034
Fokus x Textur x Härte x Exploration	2.17 (9,252)	0.025	0.072
Fokus x Textur x Härte x Temperatur	0.59 (18,504)	0.905	0.021
Fokus x Textur x Härte x Temperatur x Exploration	1.14 (18,504)	0.312	0.039
Fokus x Textur x Temperatur	0.96 (18,504)	0.507	0.033
Fokus x Textur x Temperatur x Exploration	1.12 (18,504)	0.331	0.038
Härte x Temperatur x Exploration	0.68 (6,110)	0.662	0.036
Textur x Exploration	0.98 (3,16)	0.419	0.101
Textur x Härte x Exploration	2.54 (3,26)	0.078	0.227
Textur x Härte x Temperatur	1.13 (6,110)	0.349	0.058
Textur x Härte x Temperatur x Exploration	1.40 (6,110)	0.220	0.071
Textur x Temperatur x Exploration	1.79 (6,110)	0.108	0.089

D) Immersionsfragebogen

Die Items des Immersionsfragebogens sind die Fragen aus der Subskala »Immersive Tendenz« des Präsenzfragebogens von Scheuchenpflug (2001) und werden auf einer 7-stufigen Ratingsskala beantwortet.

Die Fragen lauten im Einzelnen:

1. Lassen Sie sich leicht tief in Spiel- oder Fernsehfilme hineinziehen?
2. Sind Sie manchmal so sehr in eine Fernsehsendung oder in ein Buch vertieft, dass andere Menschen nur schwer Ihre Aufmerksamkeit auf sich ziehen können?
3. Wie oft identifizieren Sie sich stark mit den Charakteren einer Geschichte?
4. Fühlten Sie sich jemals so sehr in ein Computerspiel verwickelt, dass Sie eher das Gefühl hatten, Sie seien Teil des Spiels, als dass Sie nur einen Joystick bewegen und einen Bildschirm beobachten?
5. Wenn sie sich Sportübertragungen ansehen: Sind Sie bisweilen so sehr in ein Spiel vertieft, dass Sie wie einer der Spieler handeln?
6. Werden Sie manchmal so sehr in einen Tagtraum hineingezogen, dass Sie sich der Dinge um Sie herum nicht mehr bewusst sind?
7. Haben Sie manchmal Träume, die so real sind, dass Sie sich beim Erwachen desorientiert fühlen?
8. Hat jemals eine Jagd- oder Kampfszene in Film oder Fernsehen Aufregung bei Ihnen ausgelöst?
9. Hat Sie jemals etwas in einer Fernsehsendung oder in einem Spielfilm geängstigt?
10. Ist es Ihnen jemals passiert, dass Sie nach einem beängstigenden Film lange Zeit besorgt oder verängstigt waren?
11. Sind Sie manchmal so mit einer Sache beschäftigt, dass Sie die Zeit vergessen?

1	2	3	4	5	6	7
sehr we- nig						sehr stark

Auswertung erfolgt getrennt für die beiden Faktoren »emotionale Involvierung« (Items 6-12) und »Grad der Involvierung« (Items 1-5). Die einzelnen Ratingwerte werden über die Items summiert. In der Eichstichprobe zeigten die Probanden einen mittleren Punktwert von 22.87 (Standardabweichung $sd = 6.27$) für den Faktor emotionale Involvierung und einen mittleren Punktwert von 18.7 ($sd = 5.59$) für den Faktor Grad der Involvierung.

Weitere Informationen verfügbar unter:

<http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/mitarbeiter/wissmit/scheuchenpflug.php.de> (15.09.2007).

E) Oberflächenneigung am HSI: Nicht berichtete Ergebnisse (s. Abschnitt 5-2)

	MANOVA		
	F-Wert (df)	p	η^2
HE Neigung x Art des Kraftfeedbacks	0.57 (14,392)	0.886	0.020
WW Informationsmenge x Neigung	0.57 (14,392)	0.888	0.020
WW Informationsmenge x Neigung x Art des Kraftfeedbacks	1.46 (14,392)	0.123	0.050
WW Methode x Informationsmenge	0.15 (2,27)	0.863	0.011
WW Methode x Informationsmenge x Art des Kraftfeedbacks	3.16 (2,27)	0.058	0.190
WW Methode x Art des Kraftfeedbacks	0.08 (2,27)	0.924	0.006
WW Methode x Neigung x Art des Kraftfeedbacks	1.04 (14,392)	0.415	0.036
4 fache WW	1.16 (14,392)	0.304	0.040

F) Reizauswahl für Konstanzmethode (s. Abschnitt 7-1-4)

F1) Stimuli bei haptischer Darstellung (Gruppe H)

Vergleichsreize	Haptische Referenzreize					
	0.222 mm/N	0.851 mm/N	1.379 mm/N	0.222 mm/N + 75%	0.851 mm/N + 53%	1.379 mm/N + 52%
1 Referenzreiz	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 SD unterhalb	10%	10%	10%	10%	10%	10%
3 Zusätzlich2	20%	20%	20%	20%	20%	23%
4 Schwelle	30%	30%	30%	30%	30%	45%
5 Zusätzlich3	40%	40%	40%	40%	40%	75%
6 SD oberhalb	50%	50%	50%	50%	50%	80%
7 2 SD oberhalb	70%	70%	70%	70%	70%	115%

F2) Stimuli bei visueller Darstellung (Gruppe V)

Ausgehend von den für die haptische Gruppe bestimmten Referenznachgiebigkeiten wurden adäquate visuelle Eindringtiefen ausgewählt. Diese wurden folgendermaßen bestimmt: Die Kraft, die beim Eindringen eines Würfels mit einer Nachgiebigkeit von 1.379 mm/N um 20 mm benötigt wird, wurde errechnet und darüber die (visuelle) Eindringtiefe für die übrigen Referenzreize ermittelt.

Vergleichsreize	Visuelle Referenzreize					
	0.222 mm/N	0.851 mm/N	1.379 mm/N	0.222 mm/N + 90%	0.851 mm/N + 84%	1.379 mm/N + 55%
	3.2 mm	12.3 mm	20 mm	6.1 mm	22.7 mm	30.1 mm
1 Referenzreiz	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 SD unterhalb	25%	10%	5%	20%	5%	5%
3 Zusätzlich2	50%	20%	10%	30%	10%	10%
8 Zusätzlich 4	60%					
4 Schwelle	75%	30%	20%	40%	20%	20%
5 Zusätzlich3	90%	40%	30%	50%	30%	30%
6 SD oberhalb	100%	50%	40%	60%	40%	40%
7 2 SD oberhalb	125%	70%	60%	80%	60%	60%

F3) Stimuli bei visuell-haptisch kongruenter Darstellung (Gruppe VH)

	Visuell-haptische Referenzreize								
	0.222 mm/N	0.851 mm/N	1.379 mm/N	0.222 mm/N + 75%	0.851 mm/N + 53%	1.379 mm/N + 52%	0.222 mm/N + 90%	0.851 mm/N + 84%	1.379 mm/N + 55%
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
3	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
4	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
5	40%	40%	40%	40%	40%	45%	40%	40%	45%
6	50%	50%	50%	50%	50%	60%	50%	50%	60%
7	70%	70%	70%	70%	70%	75%	70%	70%	75%
8	80%			80%	80%	80%	80%		80%
	Auch Gruppen V, H			Auch Gruppe H			Auch Gruppe V		

F4) Stimuli bei bimodal inkongruenter Darstellung (Gruppe VHI)

	Visuell-haptische Referenzreize					
	Haptische Modalität			Visuelle Modalität		
	0.222 mm/N	0.851 mm/N	1.379 mm/N	0.222 mm/N + 75%	0.851 mm/N + 53%	1.379 mm/N + 52%
	0.222mm/N + 90%	0.851mm/N + 84%	1.379mm/N + 55%	0.222 mm/N	0.851 mm/N	1.379 mm/N
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	10%	10%	10%	10%	10%	10%
3	20%	20%	20%	20%	20%	20%
4	30%	30%	30%	30%	30%	30%
5	40%	40%	45%	40%	40%	45%
6	50%	50%	60%	50%	50%	60%
7	70%	70%	75%	70%	70%	75%
8	80%		80%	80%	80%	80%

LITERATURVERZEICHNIS

- Adams, W.J., Graf, E.W. & Ernst, M.O. (2004). Experience can change the 'light-from-above' prior. *Nature Neuroscience* 7(10), 1057-1058.
- Alais, D. & Burr, D. (2004). The Ventriloquist Effect Results from Near-Optimal Bimodal Integration. *Current Biology*, 14(3), pp. 257-262.
- Allers, R. & Halpern, F. (1921). Wechselwirkungen gleichzeitiger Erregung mehrerer Hautsinne. I. Mitteilung. Die Beeinflussung der Tastschwelle durch die Hauttemperatur. *Pflügers Archiv*, 193, 595-609.
- Amazeen, E.L. & Jarrett, W.D. (2003). The Role of Rotational Inertia in the Haptic and Haptic + Visual Size-Weight Illusions. *Ecological Psychology*, 15(4), 317-333.
- Anderson, J.R. (1996). *Kognitive Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Appelle, S. & Countryman, M. (1986). Eliminating the haptic oblique effect: influence of scanning incongruity and prior knowledge of the standards. *Perception*, 15, 325-329.
- Appelle, S. & Gravetter, F. (1985). Effect of modality-specific experience on visual and haptic judgment of orientation. *Perception*, 14, 763-773.
- Appelle, S. (1971). Visual and haptic angle perception in the matching task. *American Journal of Psychology*, 84(4), 487-499.
- Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of stimulus orientation: The "oblique effect" in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78(4), 266-278.
- Ardila, A., Uribe, B. E. & Angel, M. E. (1987). Handedness and Psychophysics: Weight and Roughness. *International Journal of Neuroscience*, 38, 17-21.
- Armstrong, L. & Marks, L.E. (1999). Haptic perception of linear extent. *Perception & Psychophysics*, 61(6), 1211-1226.
- Ashby, A., Shea, C. & Howard, R.M. (1980). Short-term memory for kinesthetic movement information: Influence of location cues on recall of distance. *Perceptual and Motor Skills*, 51, 403-406.
- Barbagli, F., Salisbury, K., Ho, C., Spence, C. & Tan, H.Z. (2006). Haptic discrimination of force direction and the influence of visual information. *ACM Transactions on Applied Perception*, 3(2), 125-135.
- Barfield, W., Hendrix, C., Bjorneseth, O., Kaczmarek, K.A. & Lotens, W. (1995). Comparison of human sensory capabilities with technical specifications of virtual environment equipment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4(4), 329-356.
- Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T. & Slater, M. (1995). Presence and Performance Within Virtual Environments. IN: W. Barfield & T.A. Furness III (Eds.), *Virtual Environment and Advanced Interface Design* (pp 473-513). Oxford University Press,.
- Bartley, S.H. (1953). The perception of size or distance based on tactile and kinesthetic data. *The Journal of Psychology*, 36, 401-408.
- Bellows, R.M. (1937). An experimental isolation of some factors determining response to rhythmic cutaneous stimulation: II. Temperature. *Journal of Experimental Psychology*, 20, 169-177.
- Bensmaïa, S.J. & Hollins, M. (1999). Complex tactile waveform discrimination. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), 1236-1245.

- Bensmaïa, S.J. & Hollins, M. (2003). The vibration of texture. *Somatosensory & Motor Research*, 20(1), 33-43.
- Bergamann-Tiest, W.M. (2007). An experimentally verified model of the perceived 'coldness' of objects. IN: *Proceedings of the 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces and Teleoperator Systems* (pp. 61-65), IEEE Computer Society, Tsukuba, Japan.
- Bertelsmann, F.W., Heimans, J.J., Weber, E.J.M. & van der Veen, E.A. (1985). Thermal discrimination thresholds in normal subjects and in patients with diabetic neuropathy. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 48, 686-690.
- Bertelson, P. & De Gelder, B. (2004). The psychology of multimodal perception. IN: C. Spence & J. Driver (Eds.), *Crossmodal space and crossmodal attention* (pp. 141-178). Oxford: University Press.
- Bevan, L., Cordo, P., Carlton, L. & Carlton, M. (1994). Proprioceptive coordination of movement sequences: discrimination of joint angle versus angular distance. *Journal of Neurophysiology*, 71(5), 1862-1872.
- Björkman, M. (1967). Relations between intra-modal and cross-modal matching. *Scandinavian Journal of Psychology*, 8, 65-76.
- Bolanowski, S.H. & Verrillo, R.T. (1982). Temperature and criterion effects in a somatosensory subsystem: a neurophysiological and psychophysical study. *Journal of Neurophysiology*, 45(3), 836-855.
- Bolanowski, S.J., Gescheider, G.A., Verrillo, R.T. & Checkosky, C.M. (1988). Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1680-1694.
- Bray, J.H. & Maxwell, S.E. (1982). Analyzing and interpreting significant MANOVAs. *Review of Educational Research*, 52(3), 340-367.
- Bresciani, J.-P., Dammeier, F. & Ernst, M.O. (2006). Vision and touch are automatically integrated for the perception of sequences of events. *Journal of Vision*, 6, 554-564.
- Bresciani, J.-P., Ernst, M.O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V. & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: Auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental Brain Research*, 162, 172-180.
- Brewer, B.R., Fagan, M., Klatzky, R.L. & Matsuoka, Y. (2005). Perceptual limits for a robotic rehabilitation environment using visual feedback distortion. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 13(1), 1-11.
- Brodie, E.E. & Ross, H.E. (1984). Sensorimotor mechanisms in weight discrimination. *Perception & Psychophysics*, 36, 477-481.
- Brown, I.D. (1960). Visual and tactual judgements of surface roughness. *Ergonomics*, 3, 51-61.
- Brown, J.S., Knauff, E.B. & Rosenbaum, G. (1948). The accuracy of positioning reactions as a function of their direction and extent. *The American Journal of Psychology*, 61, 167-182.
- Bubb, H. (1981). Analyse der Systemdynamik. IN: H. Schmidtke (Hrsg.), *Lehrbuch der Ergonomie*. München: Carl Hanser Verlag.
- Burdea, G. (1996). *Force and touch feedback for Virtual Reality*. New York: J. Wiley & Sons, Inc.

- Burton, H. & Sinclair, R. (1996). Somatosensory cortex and tactile perceptions. IN: L. Kruger (Ed.), *Pain and Touch* (pp. 105-177). San Diego: Academic Press.
- Buss, M. & Schmidt, G. (1999). Control problems in multi-modal telepresence systems. IN: P.M. Frank (Ed.): *Advances in Control, Highlights of ECC'99* (pp. 65-191). London: Springer Verlag.
- Caldwell, D.G. & Gosney, C. (1993). Multi-modal tactile sensing and feedback (tele-taction) for enhanced tele-manipulator control. IN: *Proceedings of the 1993 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 1487-1494), IEEE Computer Society, Yokohama, Japan.
- Caldwell, D.G., Lawther, S. & Wardle, A. (1996). Tactile Perception and its Application to the Design of Multi-modal Cutaneous Feedback Systems. IN: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3215-3221), IEEE Computer Society, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Calvert, G.A. Spence, C. & Stein, B.E. (2004). *The handbook of multisensory processes*. Cambridge: MIT Press.
- Calvert, G.A., Brammer, M.J. & Iversen, S.D. (1998). Crossmodal identification. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(7), 247-253.
- Calvert, G.A., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Campbell, R., Williams, S.C.R., McGuire, P.K., Woodruff, P.W.R., Iversen, S.D. & David, A.S. (1997). Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, 276, 593-596.
- Calvert, G.A., Campbell, R. & Brammer, M.J. (2000). Evidence from functional magnetic resonance imaging of crossmodal binding in the human heteromodal cortex. *Current Biology*, 10(11), 649-657.
- Cameron, P. & Wertheimer, M. (1965). Kinesthetic aftereffects are in the hands, not in phenomenal space. *Perceptual & Motor Skills*, 20, 1131-1132.
- Card, S., Moran, T. & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cascio, C.J. & Sathian, K. (2001). Temporal Cues Contribute to Tactile Perception of Roughness. *The Journal of Neuroscience*, 21(14), 5289-5296.
- Cashdan, S. (1968). Visual and haptic form discrimination under conditions of successive stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 76(2), 215-218.
- Chen, C.-C., Rainville, P. & Bushnell, M.C. (1996). Noxious and innocuous cold discrimination in humans: evidence for separate afferent channels. *Pain*, 68, 33-43.
- Chen, S. & Levi, D.M. (1996). Angle judgment: is the whole the sum of its parts? *Vision Research*, 36(2), 1721-1735.
- Cheng, M.-F. (1968). Tactile-kinesthetic perception of length. *American Journal of Psychology*, 81, 74-82.
- Chib, V.S., Patton, J.L., Lynch, K.M. & Mussa-Ivaldi, F.A. (2004). Haptic discrimination of perturbing fields and object boundaries. IN: *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems* (pp. 375-382), IEEE Computer Society, Chicago, Illinois, USA.
- Choi, Walker, Tan, Crittenden & Reifengerger (2005). Force constancy and its effect on haptic perception of virtual surfaces. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(2), 89-195.

- Cholewiak, R. & Collins, A. (1991). Sensory and Physiological Bases of Touch. IN: M.A. Heller & W. Schiff (Eds.), *The Psychology of Touch* (pp. 23-61). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Cinel, C., Humphreys, G.W. & Poli, R. (2002). Cross-modal illusory conjunctions between vision and touch. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(5), 1243-1266. I156
- Citérin, J., Pocheville, A. & Kheddar, A. (2006). A touch rendering device in a virtual environment with kinesthetic and thermal feedback. IN: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2047-2057), IEEE Computer Society, Orlando, Florida, USA.
- Clark, F.J. & Horch, K.W. (1986). Kinesthesia. In: R.K. Boff, L. Kaufman & J.B. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance – Sensory Processes and Perception* (chapter 13). New York: Wiley and Sons.
- Clark, F.J. (1992). How accurately can we perceive the positions of our limbs? *Behavioral and Brain Sciences*, 15(4), 725-276.
- Clark, F.J., Burgess, R.C. & Chapin, J.W. (1986). Proprioception with the proximal interphalangeal joint of the index finger. *Brain*, 109, 1195-1208.
- Clark, F.J., Burgess, R.C., Chapin, J.W. & Lipscomb, W.T. (1985). Role of intramuscular receptors in the awareness of limb position. *Journal of Neurophysiology*, 54(6), 1529-1540.
- Clark, F.J., Grigg, P. & Chapin, J.W. (1989). The contribution of articular receptors to proprioception with the fingers in humans. *Journal of Neurophysiology*, 61(1), 186-193.
- Claus, D., Hilz, M.J. & Neundörfer, B. (1990). Thermal discrimination thresholds: a comparison of different methods. *Acta Neurologica Scandinavia*, 81, 533-540.
- Cohen, M.M. (1981). Visual-proprioceptive interactions. IN: R.D. Walk & H.L. Pick (Eds), *Intersensory perception and sensory integration* (pp. 175-215). New York: Plenum Press.
- Cohen, D.J. & Lecci, L. (2001). Using magnitude estimation to investigate the perceptual components of signal detection theory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(2), 284-291.
- Colonus, H. & Diederich, A. (2004). Multisensory interaction in saccadic reaction time: A time-window-of-integration-model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(6), 1000-1009.
- Connolly, K. & Jones, B. (1970). A developmental study of afferent-reefferent integration. *British Journal of Psychology*, 61, 259-266.
- Connor, C.E. & Johnson, K.O. (1992). Neural Coding of Tactile Texture: Comparison of Spatial and Temporal Mechanisms for Roughness Perception. *The Journal of Neuroscience*, 12(9), 3414-3426.
- Coppen, F.M.V (1942). The differential threshold for the subjective judgement of the elastic and plastic properties of soft bodies. *British Journal of Psychology*, 32, 231-247.
- Cordo, P., Carlton, L., Bevan, L., Carlton, M. & Kerr, G.K. (1994). Proprioceptive coordination of movement sequences: Role of velocity and position information. *Journal of Neurophysiology*, 71(5), 1848-1861.
- Corson, J.H. & Crannell, C.W. (1970). Simple reaction time to cutaneous temperature stimuli. *Canadian Journal of Psychology*, 24(5), 305-310.
- Craig, A.D. & Bushnell, M.C. (1994). The Thermal Grill Illusion: Unmasking the Burn of Cold Pain. *Science*, 265, 252-255.

- Craig, J.C. & Quian, X. (1997). Tactile pattern perception by two fingers: Temporal interference and response competition. *Perception & Psychophysics*, 59(2), 252-165.
- Craig, J.C. & Rollman, G.B. (1999). Somesthesia. *Annual Review of Psychology*, 50, 305-331.
- Craig, J.C. (1972). Difference threshold for intensity of tactile stimuli. *Perception & Psychophysics*, 11(2), 150-152.
- Craig, J.C. (1974). Vibrotactile difference thresholds for intensity and the effect of a masking stimulus. *Perception & Psychophysics*, 15(1), 123-127.
- Craig, J.C. (1985). Attending to two fingers: two hands are better than one. *Perception & Psychophysics*, 38(6), 496-511.
- Cratty, B.J. & Duffy, K.E. (1969). Studies of movement aftereffects. *Perceptual & Motor Skills*, 29, 843-860.
- Dai, H. & Green, D.M. (1992). Auditory intensity perception: Successive versus simultaneous across-channel discriminations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(5), 2845-2854.
- Darian-Smith, I. & Johnson, K.O. (1977). Thermal sensibility and thermoreceptors. *The Journal of Investigative Dermatology*, 69, 146-153.
- Darian-Smith, I. & Oke, L.E. (1980). Peripheral neural representation of the spatial frequency of a grating moving across the monkey's finger pad. *Journal of Physiology*, 309, 117-133.
- Darian-Smith, I. (1984a). The sense of touch: Performance and peripheral neural processes. IN: S.R. Geiger (Ed.), *Handbook of Physiology: The nervous system – Sensory processes, section 1* (pp. 739-788). Bethesda: American Physiological Society.
- Darian-Smith, I. (1984b). Thermal sensibility. IN: S.R. Geiger (Ed.), *Handbook of Physiology: The nervous system – Sensory processes, section 1* (pp. 879-913). Bethesda: American Physiological Society.
- Darian-Smith, I., Johnson, K.O., LaMotte, C., Kenins, P., Shigenaga, Y. & Chee Ming, V. (1979). Coding of incremental changes in skin temperature by single warm fibers in the monkey. *Journal of Neurophysiology*, 42(5), 1316-1331.
- Day, R.H. & Singer, G. (1964). The relationship between the kinesthetic spatial aftereffect and variations in muscular involvement during stimulation. *Australian Journal of Psychology*, 16(3), 200-208.
- De Domenico, G. & McCloskey, D.I. (1987). Accuracy of voluntary movements at the thumb and elbow joint. *Experimental Brain Research*, 65(2), 471-478.
- De Gelder, B. & Bertelson, P. (2003). Multisensory integration, perception and ecological validity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 460-467.
- Deml, B. (2004). *Telepräsenzsysteme: Gestaltung der Mensch-System Schnittstelle*. Dissertation, Universität der Bundeswehr. Verfügbar unter <http://137.193.200.177/ediss/deml-barbara/meta.html>.
- Deml, B., Mihalyi, A. & Hannig, G. (2006). Development and Experimental Evaluation of a Thermal Display. IN: *Proceedings of the 5th International Conference EuroHaptics* (pp. 257-262), Paris, France.

- Deml, B., Ortmeier, T. & Seibold, U. (2005). The touch and feel in minimal invasive surgery. IN: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications* (pp. 33-38), IEEE Computer Society, Ottawa, Ontario, Canada.
- Dhruv, N. & Tendick, F. (2000). Frequency dependence of compliance contrast detection. IN: *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division DCS 69-2* (pp. 1087-1093), The American Society of Mechanical Engineers.
- Dick, M. & Hochstein, S. (1988). Interactions in the discrimination and absolute judgment of orientation and length. *Perception*, 17, 177-189.
- Diederich, A. & Colonius, H. (1987). Intersensory facilitation in the motor component? A reaction time analysis. *Psychological Research*, 49, 23-29.
- Dietze, A.G. (1961). Kinaesthetic discrimination: The difference limen for finger span. *The Journal of Psychology*, 51, 165-168.
- Divert, V.E. (2002). The influence of the rate of stimulus temperature rise on local skin thermal threshold. *Human Physiology*, 28(5), 573-578.
- Dixon, W.J. & Mood, A.M. (1948). A method for obtaining and analyzing sensitivity data. *Journal of the American Statistical Association*, 43(241), 109-126.
- Djupsjöbacka, M. & Domkin, D. (2005). Correlation analysis of proprioceptive acuity in ipsilateral position-matching and velocity-discrimination. *Somatosensory and Motor Research*, 22, 85-93.
- Dorsch, Hsiao, Johnson & Yoshioka (2001). Tactile attention: Subjective magnitude estimates of roughness using one or two fingers. Society for Neuroscience Abstracts.
- Draper, J.V., Kaber, D.B. & Usher, J.M. (1998). Telepresence. *Human Factors*, 40(3), 354-375.
- Drewing, K. & Ernst, M.O. (2006). Integration of force and position cues for shape perception through active touch. *Brain Research*, 1078, 92-100.
- Drewing, K., Ernst, M.O., Lederman, S.J. & Klatzky, R. (2004). Roughness and spatial density judgements on visual and haptic textures using virtual reality. IN: *Proceedings of the 4th International Conference EuroHaptics 2004* (pp. 203-206), TU-München Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Germany, Munich.
- Driver, J. & Spence, C. (2000). Multisensory perception: Beyond modularity and convergence. *Current Biology*, 10(13), 731-735.
- Dudel, J. (1973). Allgemeine subjektive Sinnesphysiologie. IN: R.F. Schmidt (Hrsg.), *Grundriß der Sinnesphysiologie* (S. 30-41). Berlin: Springer-Verlag.
- Durlach, N.I., Delhorne, L.A., Wong, A., Ko, W.Y., Rabinowitz, W.M. & Hollerbach, J. (1989). Manual discrimination and identification of length by the finger-span method. *Perception & Psychophysics*, 46(1), 29-38.
- Easton, R.D. & Moran, P.W. (1978). A quantitative confirmation of visual capture of curvature. *The Journal of General Psychology*, 98, 105-112.
- Easton, R.D. (1976). Prismaticly induced curvature and finger-tracking pressure changes in a visual capture phenomenon. *Perception & Psychophysics*, 19(2), 201-205.
- Ellis, R.R. & Lederman, S.J. (1993). The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion. *Perception & Psychophysics*, 53(3), 1681-1685.

- Ellis, R.R. & Lederman, S.J. (1998). The golf-ball illusion: evidence for top-down processing in weight perception. *Perception*, 27, 193-201.
- Ellis, R.R. & Lederman, S.J. (1999). The material-weight illusion revisited. *Perception & Psychophysics*, 61(8), 1564-1576.
- Engen, T. (1971). Psychophysics. IN: J.W. Kling & L.A. Riggs (Eds.), *Woodworth & Schlosberg's Experimental Psychology* (pp. 11-86). New York: Holt, Rinehart & Winston Inc.
- Ernst, M.O. & Banks, M.S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415, 429-433.
- Ernst, M.O. & Bühlhoff, H.H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences* 8(4), 162-169.
- Ernst, M.O., Banks, M.S. & Bühlhoff, H.H. (2000). Touch can change visual slant perception. *Nature Neuroscience*, 3(1), 69-73.
- Essock, E.A. (1980). The oblique effect of stimulus identification considered with respect to two classes of oblique effects. *Perception*, 9, 37-46.
- Essock, E.A., Krebs, W.K. & Prather, J.R. (1997). Superior sensitivity for tactile stimuli oriented proximally-distally on the finger: Implications for mixed class 1 and class 2 anisotropies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 515-527.
- Evans, G.B. & Howarth, E. (1966). The effect of grip-tension on tactile-kinaesthetic judgement of width. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18, 275-277.
- Fassé, E.D., Hogen, N., Kay, B.A. & Mussa-Ivaldi, F.A. (2000). Haptic interaction with virtual objects: Spatial perception and motor control. *Biological Cybernetics*, 82, 69-83.
- Fechner, G.T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Fechner, G.T. (1877). *In Sachen der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Fechner, G.T. (1882). *Revision der Hauptpunkte der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Ferrel, C., Lefflen, D., Orliaguet, J.-P. & Coellos, Y. (2000). Pointing movement visually controlled through a video display: Adaptation to scale change. *Ergonomics*, 43(4), 461-473.
- Fischer, H. (1937). Über den Einfluss der Hauttemperatur auf die Prickelempfindung. *Zeitschrift für Sinnesphysiologie*, 67(4), 149-158.
- Fishkin, S.M., Pishkin, V. & Stahl, M.L. (1975). Factors involved in visual capture. *Perceptual and Motor Skills*, 40, 427-434.
- Flanagan, J.R. & Bandomir, C.A. (2000). Coming to grips with weight perception: Effects of grasp configuration on perceived heaviness. *Perception & Psychophysics*, 62(6), 1204-1219.
- Flanagan, J.R. & Wing, A.M. (1997). Effects of surface texture and grip force on the discrimination of hand-held loads. *Perception & Psychophysics*, 59(1), 111-118.
- Flanagan, J.R., Wing, A.M., Allison, S. & Spenceley, A. (1995). Effects of surface texture on weight perception when lifting objects with a precision grip. *Perception & Psychophysics*, 57(3), 282-290.
- Franzén, O. & Nordmark, J. (1975). Vibrotactile frequency discrimination. *Perception & Psychophysics*, 17(5), 480-484.

- Freides, D. (1974). Human information processing and sensory modality: Crossmodal functions, information complexity, memory, and deficit. *Psychological Bulletin*, 81, 284-310.
- Freyberger, F.K.B., Popp, M., Färber, B., Mayer, H. & Schirmbeck, E.U. (2005). Experimentelle Evaluation haptischer Rückmeldung eines robotergestützten Systems für minimal-invasive Herzchirurgie. In: L. Urbas & C. Steffens (Hrsg.), *Zustandserkennung und Systemgestaltung – 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (S. 15-20). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Fruhstorfer, H. (1976). Conduction in the afferent thermal pathway of man. IN: Y. Zotterman, Y. (Ed.), *Sensory functions of the skin in primates: With special reference to man* (pp. 355-366). Oxford: Pergamon Press.
- Fruhstorfer, H. (1984). Thermal sensibility changes during ischemic nerve block. *Pain*, 20, 355-361.
- Fruhstorfer, H., Harju, E.-L. & Lindblom, U.F. (2003). The significance of A-delta and C fibres for the perception of synthetic heat. *European Journal of Pain*, 7, 63-71.
- Fruhstorfer, H., Zenz, M., Nolte, H. & Hensel, H. (1974). Dissociated loss of cold and warm sensibility during regional anesthesia. *Pflügers Archiv*, 349, 73-82.
- Fujita, K. & Oyama, Y. (1999). Control strategies in human pinch motion to detect the hardness of an object. IN: *Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 682 – 686), IEEE Computer Society.
- Gamzu, E. & Ahissar, E. (2001). Importance of temporal cues for tactile spatial-frequency discrimination. *The Journal of Neuroscience*, 1(18), 7416-7427.
- Gandevia, S.C. & McCloskey, D.I. (1976). Joint sense, muscle sense, and their combination as position sense, measured at the distal interphalangeal joint of the middle finger. *Journal of Physiology*, 260, 387-407.
- Gandevia, S.C. & McCloskey, D.I. (1977a). Effects of related sensory inputs on motor performances in man studied through changes in perceived heaviness. *Journal of Physiology*, 272, 653-672.
- Gandevia, S.C. & McCloskey, D.I. (1977b). Changes in motor commands, as shown by changes in perceived heaviness, during partial curarization and peripheral anaesthesia in man. *Journal of Physiology*, 272, 673-689.
- Gandevia, S.C., Hall, L.A., McCloskey, D.I. & Potter, E.K. (1983). Proprioceptive sensation at the terminal joint of the middle finger. *Journal of Physiology*, 335, 507-517.
- Garner, W.R. (1974). Attention: The processing of multiple sources of information. IN: E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.), *Handbook of Perception – Psychological Judgement and Measurement* (pp. 23-59). New York: Academic Press.
- Gaydos, H.F. (1958). Sensitivity in the judgment of size by finger-span. *The American Journal of Psychology*, 74, 557-562.
- Geiser, G. (1990). *Mensch-Maschine-Kommunikation*. München: Oldenbourg Verlag GmbH.
- Geldard, F. A. (1940). The perception of mechanical vibration: III. The frequency function. *The Quarterly Journal of General Psychology*, 22, 271-281.
- Geldard, F.A. (1972). *The Human Senses*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Gentaz, E. & Hatwell, Y. (1995). The haptic "oblique effect" in children's and adults' perception of orientation. *Perception*, 24, 631-646.

- Gentaz, E. & Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Perception & Psychophysics*, 58(8), 1278-1292.
- Gentaz, E. & Hatwell, Y. (1998). The haptic oblique effect in the perception of rod orientation by blind adults. *Perception & Psychophysics*, 60(1), 157-167.
- Gentaz, E. & Hatwell, Y. (1999). Role of memorization conditions in the haptic processing of orientations and the "oblique effect". *British Journal of Psychology*, 90, 373-388.
- Gentaz, E. & Hatwell, Y. (2004). Geometrical illusions: The role of exploration in the Müller-Lyer, vertical-horizontal, and Delboeuf illusions. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(1), 31-40.
- Gentaz, E., Luyat, M., Cian, C., Hatwell, Y., Barraud, P.A. & Raphel, C. (2001). The reproduction of vertical and oblique orientations in the visual, haptic, and somatovestibular system. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54A(2), 513-526.
- Gepshtein, S. & Banks, M.S. (2003). Viewing geometry determines how vision and haptics combine in size perception. *Current Biology*, 13, 483-488.
- Gepshtein, S., Burge, J., Ernst, M.O. & Banks, M.S. (2005). The combination of vision and touch depends on spatial proximity. *Journal of Vision*, 5, 1013-1023.
- Gescheider, G. A., Thorpe, J. M., Goodarz, J. & Bolanowski, S. J. (1997). The effects of skin temperature on the detection and discrimination of tactile stimulation. *Somatosensory & Motor Research*, 14(3), 181-188.
- Gescheider, G.A. (1985). *Psychophysics: Method, theory, and application*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gescheider, G.A., Bolanowsky, S.J., Verrillo, R.T., Arpajian, D.J. & Ryan, T.F. (1990). Vibrotactile intensity discrimination measured by three methods. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(1), 330-338.
- Giard, M.H. & Peronnet, F. (1999). Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans: A behavioral and electrophysiological study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(5), 473-490.
- Gibson, J.J. (1933). Adaptation, after-effect and contrast in the perception of curved lines. *Journal of Experimental Psychology*, 16(1), 1-31.
- Goble, A.K., Collins, A.A. & Cholewiak, R.W. (1996). Vibrotactile threshold in young and old observers: The effect of spatial summation and the presence of a rigid surround. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99(4), 2256-2269.
- Goff, G.D. (1967). Differential discrimination of frequency of cutaneous mechanical vibration. *Journal of Experimental Psychology*, 74(2), 294-299.
- Goldstein, E.B. (2002). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Graceley, R.H., Farrell, M.J. & Grant, M.A.B. (2002). Perception of pain and temperature. IN: H. Pahl (Ed.), *Steven's handbook of experimental psychology – Sensation and perception* (pp. 619-652). New York: John Wiley & Sons.
- Grassman, M. (1988). Deformable Materials. IN: J.G Webster (Ed.), *Tactile Sensing for Robotics and Medicine* (pp. 57-74). New York: John Wiley & Sons.
- Gray, L., Stevens, J.C. & Marks, L.E. (1982). Thermal Stimulus Thresholds: Sources of Variability. *Physiology & Behavior*, 29, 355-360.

- Green, B. G. (1977). The effect of skin temperature on vibrotactile sensitivity. *Perception & Psychophysics*, 21(3), 243-248.
- Green, B.G. & Zaharchuk, R. (2001). Spatial variation in sensitivity as a factor in measurements of spatial summation of warmth and cold. *Somatosensory & Motor Research*, 18(3), 181-190
- Green, B.G. (1977b). Localization of thermal sensation: An Illusion and synthetic heat. *Perception & Psychophysics*, 22(4), 331-337.
- Green, B.G. (1978). Referred thermal sensations: Warmth versus cold. *Sensory Processes*, 2, 220-230.
- Green, B.G. (1979). Thermo-tactile interactions: effects of touch on thermal localization. IN: D.R. Kenshalo (Ed.), *Sensory functions of the skin of humans* (pp. 223-234). New York: Plenum Press.
- Green, B.G., Lederman S.J. & Stevens, J.C. (1979). The Effect of Skin Temperature on the Perception of Roughness. *Sensory Processes*, 3, 327-333.
- Green, D.M. & Swets, J.A. (1966). Signal detection theory and psychophysics. Huntington: Robert E. Krieger Publishing Company (reprint of the original edition 1966 with corrections, 1974).
- Green, D.M. (1990). Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures. *The Journal for the Acoustical Society of America*, 87(6), 2662-2674.
- Green, D.M. (1992). A maximum-likelihood method for estimation thresholds in a yes-no task. *The Journal for the Acoustical Society of America*, 93(4), 2096-2105.
- Greenhouse, S. W. & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24(2), 95-112.
- Greenspan, J.D. & Bolanowski, S.J. (1996). The Psychophysics of Tactile Perception and Its Peripheral Physiological Basis. IN: L. Kruger (Ed.), *Pain and Touch* (pp. 25-103). San Diego: Academic Press.
- Greenspan, J.D. & Kenshalo, D.R. (1985). The primate as a model for the human temperature-sensing system: 2. Area of skin receiving thermal stimulation. *Somatosensory Research*, 2(4), 3015-324.
- Greenspan, J.D., Kenshalo, D.R. & Henderson, R. (1984). The Influence of Rate of Skin Indentation on Threshold and Suprathreshold Tactile Sensations. *Somatosensory Research*, 1(4), 379-393.
- Greenspan, J.D., Roy, E.A., Caldwell, P.A. & Farooq, N.S. (2003). Thermoisensory intensity and affect throughout the perceptible range. *Somatosensory & Motor Research*, 20(1), 19-26.
- Grundwald, M. & Beyer, L. (2001). *Der bewegte Sinn: Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Guest, S. & Spence, C. (2003a). What role does multisensory integration play in the visuo-tactile perception of texture? *International Journal of Psychophysiology*, 50, 63-80.
- Guest, S. & Spence, C. (2003b). Tactile dominance in speeded discrimination of textures. *Experimental Brain Research*, 150(2), pp. 201-207.
- Guest, S., Catmur, C., Lloyd, D. & Spence, C. (2002). Audiotactile interactions in roughness perception. *Experimental Brain Research*, 146(2), 161-171.

- Hall, J.L. (1981). Hybrid adaptive procedure for estimation of psychometric functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69(6), 1763-1769.
- Hall, L.A. & McCloskey, D.I. (1983). Detections of movements imposed on finger, elbow and shoulder joints. *Journal of Physiology*, 335, 519-533.
- Harding, L.M. & Loescher, A.R. (2005). Adaptation to warming but not cooling at slow rates of stimulus change in thermal threshold measurements. *Somatosensory & Motor Research*, 22(1/2), 45-48.
- Hardy, J.D. & Opper, Th.W. (1937). Studies in temperature sensation. III. The sensitivity of the body heat and the spatial summation of the end organ responses. *Journal of Clinical Investigation*, 16(4), 533-540.
- Harper, R. (1952). Psychological and psycho-physical studies of craftsmanship in dairying. Cambridge: University Press.
- Hatwell, Y. (1960). Études de quelques illusions géométriques tactiles chez les aveugles. *L'année Psychologique*, 60, 11-27.
- Hayward, V., Astley, O.R., Cruz-Hernandez, M., Grant, D. & Robles-De-La-Torre, G. (2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1), 16-29.
- Haverland, E.M. (1979). Magnitude estimation: A new method for measuring subjective test variables. *USATTC Report No. 790601*, United States Army Tropic Test Center.
- Hecht, D., Reiner, M. & Halevy, G. (2006). Multimodal virtual environments: Response times, attention, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5), 515-523.
- Heeley, D.W. & Buchanan-Smith, H.M. (1993). On the relationship between geometrical organisation and local organisation: discrimination of angles. *Perception*, 22 Supplement, 35-36.
- Heeley, D.W. & Timney, B. (1984). Meridional anisotropies of orientation discrimination for sine wave gratings. *Vision Research*, 24(2), 337-344.
- Helbig, H.B. & Ernst, M.O. (2004). Effect of attention on multimodal cue integration. IN: *Proceedings of 4th International Conference EuroHaptics* (pp. 524-527), TU-München Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Germany, Munich.
- Helbig, H.B. & Ernst, M.O. (2007). Optimal integration of shape information from vision and touch. *Experimental Brain Research*, 179, 595-606.
- Helbig, H.B. & Ernst, M.O. (in press). Knowledge about a common source can promote visual-haptic integration. *Perception*.
- Heller, M.A. & Joyner, T.D. (1993). Mechanisms in the haptic horizontal-vertical illusion: Evidence from sighted and blind subjects. *Perception & Psychophysics*, 53(4), 422-428.
- Heller, M.A. (1982). Visual and tactual texture perception: Intersensory cooperation. *Perception & Psychophysics*, 1982, 31(4), 339-344. 169
- Heller, M.A. (1983). Haptic dominance in form perception with blurred vision. *Perception*, 12, 607-613.
- Heller, M.A. (1985). Effect of magnification on texture perception. *Perceptual and Motor Skills*, 61, 1241.
- Heller, M.A. (1992). Haptic dominance in form perception: Vision versus proprioception. *Perception*, 21, 655-660.

- Heller, M.A., Calcaterra, J.A., Burson, L.L. & Green, S.L. (1997). The tactual horizontal-vertical illusion depends on radial motion of the entire arm. *Perception & Psychophysics*, 59(8), 1297-1311.
- Heller, M.A., Calcaterra, J.A., Green, S.L. & Brown, L. (1999). Intersensory conflict between vision and touch: The response modality dominates when precise, attention-riveting judgments are required. *Perception & Psychophysics*, 61(7), 1384-1398
- Henriques, D.Y.P. & Soechting, J.F. (2003). Bias and sensitivity in the haptic perception of geometry. *Experimental Brain Research*, 150, 95-108.
- Hensel, H. & Huopaniemi, T. (1969). Static and dynamic properties of warm fibres in the infraorbital nerve. *Pflügers Archiv*, 309(1), 1-10.
- Hensel, H. & Zotterman, Y. (1951). Quantitative Beziehungen zwischen der Entladung einzelner Kältefasern und der Temperatur. *Acta Physiologica Scandinavia*, 23, 291-319.
- Hensel, H. (1950). Temperaturempfindung und intracutane Wärmebewegung. *Pflügers Archiv*, 252, 165-215.
- Hensel, H. (1952). Physiologie der Thermoreception. *Ergebnisse der Physiologie*, 47, 166-368.
- Hensel, H. (1968). Electrophysiology of cutaneous thermoreceptors. IN: D.R. Kenshalo (Ed.), *The Skin Senses* (pp.384-399). Springfield: Charles C. Thomas Publishers.
- Hensel, H. (1976). Correlations of neural activity and thermal sensation in man. IN: Y. Zotterman (Ed.), *Sensory functions of the skin in primates: With special reference to man* (pp. 331-353). Oxford: Pergamon Press.
- Hershberger, W.A., Misceo, G.F. (1996). Touch dominates haptic estimates of discordant visual-haptic size. *Perception & Psychophysics*, 58(9), 1124-1132.
- Hesse, C.W. & Wing, A.M. (1999). PHANTOM psychophysics: Movement detection at the Human fingertip. IN: *Proceedings of the 1st PHANTOM User Research Symposium* (pp. 21-24), Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg.
- Hill (2002). Psignifit-Software Version 2.5.6. Verfügbar unter <http://www.bootstrap-software.org/psignifit/> (15.9.2007)
- Hillis, J.M., Ernst, M.O., Banks, M.S. & Landy, M.S. (2002). Combining sensory information: Mandatory fusion within, but not between, senses. *Science* 298, 1627-1630.
- Hillis, J.M., Watt, S.J., Landy, M.S. & Banks, M.S. (2004). Slant from Texture and Disparity Cues: Optimal Cue Combination. *Journal of Vision*, 4(13), 1-24.
- Hilz, M.J., Stemper, B., Axelrod, F.B., Kolodny, E.H. & Neundörfer, B. (1999). Quantitative Thermal Perception Testing in Adults. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 16(5), 462-471.
- Hinterseer, P., Steinbach, E., Hirche, S. & Buss, M. (2005). A novel, psychophysically motivated transmission approach for haptic data streams in telepresence and teleaction systems. IN: *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* (pp. 1097-1100), IEEE Computer Science, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Hirche, S. (2005). Haptic telepresence in packet switched communication networks. Thesis, TU München. Available on <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss20050919-2000268707>.

- Hirche, S., Hinterseer, P., Steinbach, E. & Buss, M. (2005a). Towards deadband control in networked teleoperation systems. IN: *Proceedings of the 16th International Federation of Automatic Control World Congress*, Elsevier Company, Prague, Czech Republic.
- Hirche, S., Hinterseer, P., Steinbach, E. & Buss, M. (2005b). Network traffic reduction in haptic telepresence systems by deadband control. IN: *Proceedings of the 16th International Federation of Automatic Control World Congress*, Elsevier Company, Prague, Czech Republic.
- Hirche, S., Stanczyk, B. & Buss, M. (2004). Haptic Tele-Assembly over the Internet. IN: *Proceedings of the 4th International EuroHaptics Conference* (pp. 417-421), TU München Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Germany, Munich.
- Hogan, N., Kay, B.A., Fassé, E.D. & Mussa-Ivaldi, F.A. (2005). Haptic illusions: Experiments on human manipulation and perception of "virtual objects". *Cold Spring Harbor Symposia on Qualitative Biology*, 55, 925-931.
- Hollingworth, H.L. (1909). The perceptual basis for judgements of extent. *The Journal of Philosophy, Psychology and Scientific Methods*, 6(23), 623-626.
- Hollins, M. & Risner, R. (2000). Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Perception & Psychophysics*, 62(4), 695-705.
- Hollins, M. (2002). Touch and haptics. IN: H. Pahsler & S. Yantis (Eds.), *Steven's handbook of experimental psychology – Sensation and perception* (pp. 585-618). New York: Wiley.
- Hollins, M., Bensmaïa, S., Karlof, K. & Young, F. (2000). Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling. *Perception & Psychophysics*, 62(8), 1534-1544.
- Hollins, M., Bensmaïa, S.J. & Roy, E.A. (2002). Vibrotaction and texture perception. *Behavioural Brain Research*, 135, 51-56.
- Hollins, M., Bensmaïa, S.J. & Washburn, S. (2001). Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures. *Somatosensory & Motor Research*, 18(4), 253-262.
- Hollins, M., Faldowski, R., Rao, S. & Young, F. (1993). Perceptual dimensions of tactile surface texture: A multidimensional scaling analysis. *Perception & Psychophysics*, 54(6), 697-705.
- Hollins, M., Fox, A. & Bishop, C. (2001). Imposed vibration influence perceived tactile smoothness. *Perception*, 30, 1455-1465.
- Holmes, N.P. & Spence, C. (2005). Multisensory integration: Space, time and superadditivity. *Current Biology*, 15(18), 762-764.
- Holway, A.H. & Hurvich, L.M. (1937). On the discrimination of minimal differences in weight: 1. A theory of differential sensitivity. *The Journal of Psychology*, 4, 309-332.
- Holway, A.H., Golding, L.E. & Zigler, M.J. (1938). On the discrimination of minimal differences in weight: IV. kinesthetic adaptation for exposure-intensity as variant. *Journal of Experimental Psychology*, 23, 536-544.
- Holway, A.H., Smith, J.E. & Zigler, M.J. (1937). On the discrimination of minimal differences in weight: II. number of available elements as variant. *Journal of Experimental Psychology*, 20, 371-380.
- Homann, J. (2005). *Sensitivität bei der Wahrnehmung von Rauheit*. Nicht veröffentlichte Studienarbeit, Universität der Bundeswehr München.

- Howard, I.P. & Anstis, T. (1974). Muscular and joint-receptor components in postural persistence. *Journal of Experimental Psychology*, 103(1), 167-170.
- Howard, I.P. & Templeton, W.B. (1966). Kinaesthesia. IN: I.P. Howard & W.B. Templeton (Eds.), *Human spatial orientation* (pp. 71-96). London: J. Wiley & Sons.
- Hsiao, S.S. & Vega-Bermudez, F. (2002). Attention in the somatosensory system. IN: R.J. Nelson (Ed), *The somatosensory system: Deciphering the brain's own body image* (pp. 197-217). Boca Raton: CRC Press.
- Hugony, A. (1935). Über die Empfindung von Schwingungen mittels des Tastsinnes. *Zeitschrift für Biologie*, 96, 548-553.
- Ijsselstein, W.A., de Ridder, H., Freeman, J. & Avons, S.E. (2000). Presence: Concept, determinants and measurement. IN: *Proceedings of the SPIE Human Vision and Electronic Imaging V* (pp. 520-529), The International Society for Optical Engineering, San Jose, California, USA.
- Inman, D.R. & Peruzzi, P. (1961). The effects of temperature on the responses of Pacinian corpuscles. *Journal of Physiology*, 155, 280-301.
- Ino, S., Shimizu, S., Odagawa, T., Sato, M., Takahashi, M., Izumi, T. & Ifukube, T. (1993). A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface. IN: *Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication* (pp. 220-224), IEEE Computer Science, Tokyo, Japan.
- Irtel, H. (2005). Psychological scaling. IN: B.S. Everitt & D.C. Howell (Eds.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science* (pp. 1628-1632). Chichester: J. Wiley & Sons.
- Ishiko, N. & Löwenstein, W.R. (1961). Effects of temperature on the generator and action potentials of a sense organ. *Journal of General Physiology*, 45, 105-124.
- Jack, C.E. & Thurlow, W.R. (1973). Effects of degree of visual association and angle of displacement on the "ventriloquism" effect. *Perceptual & Motor Skills*, 37, 967-979.
- Jamal, G.A., Hansen, S., Weir, A.I. & Ballantyne, J.P. (1985). An improved automated method for the measurement of thermal thresholds: 1. normal subjects. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 48, 354-360.
- Jansson, G. & Billberger, K. (1999). The PHANTOM used without visual guidance. IN: *Proceedings of the 1st PHANTOM User Research Symposium* (pp. 27-30), Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg
- Järvilehto, T. & Hämmäläinen, H. (1979). Touch and thermal sensations: psychophysical observations and unit activity in human skin nerves. IN: D.R. Kenshalo (Ed.), *Sensory functions of the skin of humans* (pp. 279-295). New York: Plenum Press.
- Jastrow, J. (1886). The perception of space by disparate senses. *Mind*, 11, 539-554.
- Jiang, W., Wallace, M.T., Jiang, H., Vaughan, J.W. & Stein, B.E. (2001). Two cortical areas mediate multisensory integration in superior colliculus neurons. *Journal of Neurophysiology*, 85, 506-522.
- Johannsen, G. (1993). *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer-Verlag.
- Johnson, K. (2002). Neural basis of haptic perception. IN: H. Pahsler & S. Yantis (Ed.), *Steven's handbook of experimental psychology – Sensation and perception* (pp. 537-584). New York: John Wiley & Sons.

- Johnson, K.O. & Lamb, G.D. (1981). Neural mechanisms of spatial tactile discrimination: neural patterns in the monkey. *Journal of Physiology*, 310, 117-144.
- Johnson, K.O. & Phillips, J.R. (1981). Tactile Spatial Resolution. I. Two-Point Discrimination, Gap Detection, Grating Resolution, and Letter Recognition. *Journal of Neurophysiology*, 46(6), 1177-1191.
- Johnson, K.O. & Yoshioka, T. (2002). Neural mechanisms of tactile form and texture perception. IN: S.J. Nelson (Ed.), *The somatosensory system: Deciphering the brain's own body image* (pp. 73-101). Boca Raton: CRC Press.
- Johnson, K.O. (1983). Neural mechanisms of tactual form and texture discrimination. *Federation Proceedings*, 42, 2542-2547.
- Johnson, K.O., Darian-Smith, I. & LaMotte, C. (1973). Peripheral neural determinants of temperature discrimination in man: a correlative study of responses to cooling skin. *Journal of Neurophysiology*, 36, 347-370.
- Johnson, K.O., Darian-Smith, I., LaMotte, C., Johnson, B. & Oldfield, S. (1979). Coding of incremental changes in skin temperature by a population of warm fibers in the monkey: Correlation with intensity discrimination in man. *Journal of Neurophysiology*, 42(5), 1332-1353.
- Johnson, K.O., Hsiao, S.S. & Yoshioka, T. (2002). Neural Coding and the Basic Law of Psychophysics. *The Neuroscientist*, 8(2), 111-121.
- Johnson, K.O., Phillips, J.R., Hsiao, S.S. & Bankman, I.N. (1989). Tactile pattern recognition. Franzén, O. & Westman, J. (eds.). *Information processing in the somatosensory system* (pp. 305-318). New York: Stockton Press.
- Jones, B. & Connolly, K. (1970). Memory effects in cross-modal matching. *British Journal of Psychology*, 61(2), 267-270.
- Jones, B. & O'Neil, S. (1985). Combining vision and touch in texture perception. *Perception & Psychophysics*, 37(1), 66-72.
- Jones, B. (1983). Psychological analyses of haptic and haptic-visual judgements of extent. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 597-606.
- Jones, L.A. & Berris, M. (2002). The psychophysics of temperature perception and thermal-interface design. IN: *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 137-142), IEEE Computer Science, Orlando, Florida, USA.
- Jones, L.A. & Berris, M. (2003). Material discrimination and thermal perception. IN: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 171-178), IEEE Computer Science, Los Angeles, California, USA.
- Jones, L.A. & Hunter, I.W. (1990). A perceptual analysis of stiffness. *Experimental Brain Research*, 79, 150-156.
- Jones, L.A. (1989). Matching forces: constant errors and differential thresholds. *Perception*, 18(5), 681-687
- Jones, L.A., Hunter, I.W. & Irwin, R.J. (1992). Differential thresholds for limb movement measured using adaptive techniques. *Perception & Psychophysics*, 52(5), 529-535.
- Jousmäki, V. & Hari, R. (1998). Parchment-skin illusion: sound-biased touch. *Current Biology*, 8(6), p.190.

- Kaernbach, C. (1991). Simple adaptive testing with the weighted up-down method. *Perception & Psychophysics*, 49, 227-229.
- Kaernbach, C. (2001). Adaptive threshold estimation with unforced-choice tasks. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1377-1388.
- Kammermeier, P. (2004). Verteilte taktile Stimulation zur Vermittlung mechanischer Berührungsinformationen in Telepräsenz Anwendungen. Dissertation, Technische Universität München. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kammermeier, P., Kron, A., Hoogen, J. & Schmidt, G. (2004). Display of Holistic Haptic Sensations by Combined Tactile and Kinesthetic Feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13 (1), 1-15.
- Kappers, A.M.L. (1999). Large systematic deviations in the haptic perception of parallelity. *Perception*, 28, 1001-1012.
- Kappers, A.M.L. (2002). Haptic perception of parallelity in the midsagittal plane. *Acta Psychologica*, 109, 25-40.
- Kappers, A.M.L. (2003). Large systematic deviations in a bimanual parallelity task: further analysis of contributing factors. *Acta Psychologica*, 114, 131-145.
- Kappers, A.M.L. (2004). The contribution of egocentric and allocentric reference frames in haptic spatial tasks. *Acta Psychologica*, 117, 333-340.
- Katz, D. & Stephenson, W. (1937). Experiments on Elasticity. *British Journal of Psychology*, 28, 190-194.
- Katz, D. (1925). Aufbau der Tastwelt. Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, Ergänzungsband 11.
- Kawabata, N. (1981). Analysis of the angle perception based on the angle matching technique. *Vision Research*, 21, 701-703
- Kawai, S. (2003a). Heaviness perception - III. Weight/aperture in the discernment of heaviness in cubes haptically perceived by thumb-index finger grasp. *Experimental Brain Research*, 221, 289-296.
- Kawai, S. (2003b). Heaviness perception - IV. Weight x aperture - 1 as a heaviness model in finger-grasp perception. *Experimental Brain Research*, 221, 297-301.
- Kelso, J.A.S. (1977). Motor control mechanisms underlying human movement reproduction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3(4), 529-543.
- Kelvin, R.P. (1954). Discrimination of size by sight and touch. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 6, 23-34.
- Kenshalo, D.R. & Scott, H.A. (1966). Temporal Course of Thermal Adaptation. *Science*, 151, 1095-1096.
- Kenshalo, D.R. (1970). Psychophysical Studies of Temperature Sensitivity. IN: W.E. Neff (Ed.), *Contributions to Sensory Physiology* (pp. 19-74). New York: Academic Press.
- Kenshalo, D.R. (1971). The Cutaneous Senses. IN: J.W. Kling & L.A. Riggs (Eds.), *Woodworth & Schlosberg's Experimental Psychology* (pp. 117-168). New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Kenshalo, D.R. (1976). Correlations of temperature sensitivity in man and monkey, a first approximation. IN: Y. Zotterman (Ed.), *Sensory functions of the skin in primates: With special reference to man* (pp. 305-330). Oxford: Pergamon Press.

- Kenshalo, D.R., Decker, T. & Hamilton, A. (1967). Spatial summation on the forehead, forearm, and back produced by radiant and conducted heat. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 63(3), 510-515.
- Kenshalo, D.R., Holmes, C.E. & Wood, P.B. (1968). Warm and cold thresholds as a function of rate of stimulus temperature change. *Perception & Psychophysics*, 3(2A), 81-83.
- Kerst, S.M. & Howard, J.H. (1978). Memory psychophysics for visual area and length. *Memory & Cognition*, 6(3), 327-335.
- Kheddar, A., Drif, A., Citérin, J. & Le Mercier, B. (2004). A multi-level haptic rendering concept. IN: *Proceedings of the 4th International Conference EuroHaptics* (pp. 147-154), TU-München Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Germany, Munich.
- Kinney, J.A. S. & Luria, S.M. (1970). Conflicting visual and tactual-kinesthetic stimulation. *Perception & Psychophysics*, 8(3), 189-192. 199
- Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (1992). Stages of manual exploration in haptic object identification. *Perception & Psychophysics*, 52(6), 661-670.
- Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (1995). Identifying objects from a haptic glance. *Perception & Psychophysics*, 57(8), 1111-1123.
- Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (1999). Tactile roughness perception with rigid link interposed between skin and surface. *Perception & Psychophysics*, 61(4), 591-607.
- Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (2003a). Touch. IN: A.F. Healy & R.W. Proctor (Eds.), *Handbook of Psychology – Experimental Psychology* (pp. 147-176). New York: Wiley.
- Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (2003b). Representing spatial location and layout from sparse kinesthetic contacts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 310-325.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Langseth, S. (2003). Watching a Cursor Distorts Haptically Guided Reproduction of Mouse Movement. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(4), 228-235.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Matula, D.E. (1991). Imagined Haptic Exploration in Judgements of Object Properties. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17(2), 314-322.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Matula, D.E. (1993). Haptic Exploration in the Presence of Vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(4), 726-743
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Metzger, V.A. (1985). Identifying objects by touch: An “expert” system. *Perception & Psychophysics*, 37(4), 299-302.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & O'Neill, C. (1996). Haptic object processing I: Early perceptual features. IN: O. Franzén, R. Johansson & L. Terenius (Eds.), *Somethesis and the Neurobiology of the Somatosensory Cortex* (pp. 147-152). Basel: Birkhäuser Verlag.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Reed, C. (1987). There's More to Touch Than Meets the Eye: The Saliency of Object Attributes for Haptics With and Without Vision. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(4), 356-369.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J. & Reed, C. (1989). Haptic integration of object properties: texture, hardness, and planar contour. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(1), 45-57.

- Klatzky, R.L., Lederman, S.J., Hamilton, C., Grindley, M. & Swendsen, R.H. (2003). Feeling textures through a probe: Effects of probe and surface geometry and exploratory factors. *Perception & Psychophysics*, 65(4), 613-631.
- Klatzky, R.L., Lederman, S.J., Pellegrino, J.W., Doherty, S. & McCloskey, B.P. (1990). Procedures for Haptic Object Exploration vs. Manipulation. IN: M.A. Goodale (Ed.), *Vision and Action: The control of grasping*. Norwood (pp. 110-127). New York: Ablex Publication Corporation.
- Klatzky, R.L., Loomis, J.M., Lederman, S.J., Wake, H., Fujita, N. (1993). Haptic identification of objects and their depictions. *Perception & Psychophysics*, 54(2), 170-178.
- Klein, S.A. (2001). Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1421-1455.
- Kleffner, M.-A. (2006). Effekte der Quantisierung haptischer und visueller Daten auf die menschliche Performanz und das Telepräsenzerleben. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Institut für Arbeitswissenschaft.
- Knill, D.C. & Saunders, J.A. (2003). Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgements of surface slant? *Vision Research*, 43, 2539-2558.
- Konietzny, F. & Hensel, H. (1979). The neural basis of the sensory quality of warmth. IN: D.R. Kenshalo (Ed.), *Sensory functions of the skin of humans* (pp. 241-256). New York: Plenum Press.
- Konietzny, F. (1984). Peripheral neural correlates of temperature sensations in man. *Human Neurobiology*, 3, 21-32.
- Kron, A. & Schmidt, G. (2003). Multi-fingered tactile feedback from virtual and remote environment. IN: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 16-23), IEEE Computer Science, Los Angeles, California, USA.
- Kron, A. & Schmidt, G. (2005). Haptisches Telepräsenzsystem zur Unterstützung bei Entschärfungstätigkeiten: Systemgestaltung, Regelung und Evaluation. *Automatisierungstechnik*, 3, 101-113.
- Kron, A. (2005). Beiträge zur bimanuellen und mehrfingerigen haptischen Informationsvermittlung in Telepräsenzsystemen. Dissertation, TU München. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kuchling, H. (1988). *Taschenbuch der Physik*. Thun: Verlag Harri Deutsch.
- Kumazaki, A., Terade, K. & Ito, A. (2007). Role of vision on haptic length perception. In: *Proceedings of the 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces and Teleoperator Systems*, IEEE Computer Society, Tsukuba, Japan, 336 - 341.
- Kuschel, M. (2004). *Konstruktion eines SCARA-Roboters zur Erforschung von Regelungsstrategien in der Telepräsenz*. Studienarbeit, Technische Universität Berlin.
- Kuschel, M. Perception and psychophysical enhanced control in visual-haptic telepresence system. Thesis, TU München, in preparation.
- Kuschel, M., Kremer, P., Hirche, S. & Buss, M. (2006). Lossy data reduction methods for haptic telepresence systems. IN: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2933-2938), IEEE Computer Science, Orlando, Florida, USA.
- Kwon, J.C., Lee, B.H., Ji, J.M., Jeong, Y., Kim, B.J., Heilman, K.M. & Na, D.L. (2004). Length perception and production of normal subjects in proximal versus distal peripersonal space. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10, 913-191.

- La Motte, R.H. & Mountcastle, V.B. (1975). Capacities of humans and monkeys to discriminate between vibratory stimuli of different frequency and amplitude: a correlation between neural events and psychophysical mechanisms. *Journal of Neurophysiology*, 38, 539-559.
- La Motte, R.H. & Srinivasan, M.A. (1989). Surface microgeometry: Tactile perception and neural encoding. IN: O. Franzén & J. Westman (Eds.), *Information processing in the somatosensory system* (pp. 49-59). New York: Stockton Press.
- La Motte, R.H. (2000). Softness discrimination with a tool. *Journal of Neurophysiology*, 83(4), 1777-1786.
- Laidlaw, R.W. & Hamilton, M.A. (1937). A study of thresholds in apperception of passive movement among normal control subjects. *Bulletin of the Neurological Institute of New York*, 268-278.
- Lakatos, S. & Marks, L.E. (1998). Haptic underestimation of angular extent. *Perception*, 27, 737-754.
- Lamb, G.D. (1983). Tactile discrimination of textured surfaces: psychophysical performance measurements in humans. *Journal of Physiology*, 338, 551-565.
- Lamoré, P.J.J., Muijser, H. & Keemink, C.J. (1986). Envelope detection of amplitude-modulated high frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79(4), 1082-1085.
- Langfeld, H.S. (1917). The differential spatial limen for finger span. *Journal of Experimental Psychology*, 2, 416-430.
- Lappin, J.S. & Foulke, E. (1973). Expanding the tactual field of view. *Perception & Psychophysics*, 14(2), 237-241.
- Larkin, W.D. & Reilly, J.P. (1986). Electrocutaneous sensitivity: Effects of skin temperature. *Somatosensory Research*, 3(3), 261-271.
- Lechelt, E., Eliuk, J. & Tanne, G. (1976). Perceptual orientation asymmetries: A comparison of visual and haptic space. *Perception & Psychophysics*, 20(6), 463-469.
- Lechelt, E.C. & Verenka, A. (1980). Spatial anisotropy in intramodal and cross-modal judgements of stimulus orientation: the stability of the oblique effect. *Perception*, 9, 581-589.
- Lechelt, E.C. (1988). Spatial asymmetries in tactile discrimination of line orientation: A comparison of the sighted, visually impaired, and blind. *Perception*, 17, 579-585.
- Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Coquillart, S. & Coiffet, P. (2001). "Boundary of Illusion": An experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. IN: *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality* (115-122), IEEE Computer Science, Yokohama, Japan.
- Lederman, S.J. & Abbott, S.G. (1981). Texture Perception: Studies of Intersensory Organization Using a Discrepancy Paradigm, and Visual Versus Tactile Psychophysics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(4), 902-915.
- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (1987). Hand Movements: A Window into Haptic Object Recognition. *Cognitive Psychology*, 19, 342-368.
- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (1990). Haptic Classification of Common Objects: Knowledge-Driven Exploration. *Cognitive Psychology*, 22, 421-459.
- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (1993). Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychologica*, 84(1), 29-40.

- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (1995). Processing haptic features from an initial brief contact. IN: *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division DSC 57-2* (pp. 675-680), The American Society of Mechanical Engineers.
- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (1997). Relative availability of surface and object properties during early haptic processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(6), 1680-1707.
- Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (2004). Multisensory texture perception. IN: G.A. Calvert, C. Spence & B.E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp.107-122). Cambridge: MIT Press.
- Lederman, S.J. & Taylor, M.M. (1972). Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch. *Perception & Psychophysics*, 12(5), 401-408.
- Lederman, S.J. (1974). Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 385-395.
- Lederman, S.J. (1979). Auditory texture perception. *Perception*, 8, 93-103.
- Lederman, S.J., Browse, R.A. & Klatzky, R.L. (1988). Haptic processing of spatially distributed information. *Perception & Psychophysics*, 44(3), 222-232.
- Lederman, S.J., Klatzky, R.L. & Reed, C.L. (1993). Constraints on haptic integration of spatially shared object dimensions. *Perception*, 22, 723-743.
- Lederman, S.J., Loomis, J.M. & Williams, D.A. (1982). The role of vibration in the tactual perception of roughness. *Perception & Psychophysics*, 32(2), 109-116.
- Lederman, S.J., Martin, A., Tong, C. & Klatzky, R.L. (2003). Relative Performance using Haptic and/or Touch-Produced Auditory Cues in a Remote Absolute Texture Identification Task. IN: *Proceedings of the 11th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 151- 158), IEEE Computer Science, Los Angeles, California, USA.
- Lederman, S.J., Summers, C. & Klatzky, R.L. (1996). Cognitive salience of haptic object properties: Role of modality-encoding bias. *Perception*, 25, 983-998.
- Lederman, S.J., Thorne, G. & Jones, B. (1986). Perception of Texture by Vision and Touch: Multidimensionality and Intersensory Integration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(2), 169-180.
- Lee, D.K., McGillis, S.L.B. & Greenspan, J.D. (1996). Somatopic Localisation of Thermal Stimuli: I. A Comparison of Within- versus Across-Dermatome Separation of Innocuous Thermal Stimuli. *Somatosensory & Motor Research*, 13(1), 67-71.
- Leek, M.R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1279-1292.
- Letschnik, J., Raif, M., Pauly, K. & Walter, U. (2005). BayernSat - How to Utilize Relay Satellites for Real-Time Data Acquisition on Small Satellites. IN: *Proceedings of the 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation*, Berlin, Deutschland.
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), 467-477.
- Lindeman, R. (2003). Virtual contact: The continuum from purely visual to purely physical. IN: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting* (pp. 2103-2107), Denver, Colorado, USA.

- Lindeman, R.W. & Templeman, J.N. (2001). Vibrotactile feedback for handling virtual contact in immersive virtual environments. IN: M.J. Smith, G. Salvendy, D. Harris & R.J. Koubek (Eds), *Usability Evaluation and Interface Design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality* (pp. 21-25). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lindsay, P.H. & Norman, D.A. (1977). *Human information processing – An introduction to psychology*. New York: Academic Press.
- Lombard, M. & Ditton, T. (1997). At the Heart of it All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), available on <http://jcmc.indiana.edu/vol3/issue2/lombard.html> .
- Loo, C.K.C., Hall, L.A., McCloskey, D.I. & Rowe, M.J. (1983). Proprioceptive contributions to tactile identification of figures: dependence on figure size. *Behavioural Brain Research*, 7, 383-386.
- Loomis, J.M. & Lederman, S.J. (1986). Tactual Perception. In: R.K. Boff, L. Kaufman & J.B. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance – Cognitive Processes and Performance* (chapter 31). New York: Wiley and Sons.
- Loomis, J.M., Klatzky, R.L. & Lederman, S.J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception*, 20, 167-177.
- Luyat, M., Gentaz, E., Corte, T.R. & Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation: Body and head tilt effects on the oblique effect. *Perception & Psychophysics*, 63(3), 541-554.
- Macaluso, E., Frith, C.D. & Driver, J. (2000). Modulation of human visual cortex by cross-modal spatial attention. *Science*, 189, 1206-1208.
- Macmillan, N.A. & Creelman, C.D. (2005). *Detection theory: A user's guide*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Maher, C. & Adams, R. (1995). A psychophysical evaluation of manual stiffness discrimination. *Australian Physiotherapy*, 41(3), 161-167.
- Maher, C. & Adams, R. (1996). A comparison of pisiform and thumb grips in stiffness assessment. *Physical Therapy*, 76(1), 41-48.
- Maher, C. (1995). Perception of stiffness in manipulative physiotherapy. *Physiotherapy: Theory and Practice*, 11, 35-44.
- Makous, J.C., Gescheider, G.A. & Bolanowski, S.J. (1996). The effects of static indentation on vibrotactile threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5), 3149-3153.
- Mantovani, G. & Riva, G. (1999). "Real" Presence: How Different Ontologies Generate Different Criteria for Presence, Telepresence, and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8, 540-550.
- Marks, L.E. (1974). *Sensory Processes - The New Psychophysics*. New York: Academic Press.
- Marks, L.E. (1978). *The unity of the senses – Interrelations among the modalities*. New York: Academic Press.
- Marks, L.E. (2004). Cross-modal interactions in speeded classification. IN: G.A. Calvert, C. Spence & B.E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 85-105). Cambridge: MIT Press.

- Marks, L.E., Stevens, J.C. & Tepper, S.J. (1976). Interaction of spatial and temporal summation in the warmth sense. *Sensory Processes*, 1, 87-98.
- Massaro, D.W. & Friedman, D. (1990). Models of integration given multiple sources of information. *Psychological Review*, 97(2), 225-252.
- Massaro, D.W. (1987). Information-processing theory and strong inference: A paradigm for psychological inquiry. IN: H. Heuer & A.F. Sanders (Eds), *Perspectives on perception and action* (pp. 273-299). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Massaro, D.W. (1999). Speechreading: illusion or window into pattern recognition. *Trends in Cognitive Science*, 3(8) 310-317.
- McCloskey, D.I. (1978). Kinesthetic sensibility. *Physiological Reviews*, 58(4), 763-820.
- McCloskey, D.I. (1980). Kinaesthetic sensations and motor commands in man. *Progress in Clinical Neurophysiology*, 8, 203-214
- McDonnell, P.M. & Duffett, J. (1972). Vision and touch: A reconsideration of conflict between the two senses. *Canadian Journal of Psychology*, 26(2), 171-180.
- McGurk, H. & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264, 746-748.
- McLaughlin, M., Sukhatme, G., Peng, W., Zhu, W. & Parks, J. (2003). Performance and Co-presence in Heterogeneous Haptic Collaboration. IN: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 285- 291), IEEE Computer Science, Los Angeles, California, USA.
- Meredith, M.A. (2002). On the neuronal basis for multisensory convergence: A brief overview. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 31-40.
- Meredith, M.A., Nemitz, J.W. & Stein, B.E. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons: I. Temporal factors. *The Journal of Neuroscience*, 7(10), 3215-3229.
- Milewski, A.E. & Iaccino, J. (1982). Strategies in cross-modality matching. *Perception & Psychophysics*, 31(3), 273-275.
- Miller, E.A. (1972). Interaction of vision and touch in conflict and nonconflict form perception tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 96(1), 114-123.
- Mioche, L., Auroy, P., Lepetit, J. & Compagnon, D. (1991). Oral perception of hardness in viscoelastic products. *Journal of Texture Studies*, 22, 333-347.
- Misceo, G.F., Hershberger, W.A. & Mancini, R.L. (1999). Haptic estimates of discordant visual-haptic size vary developmentally. *Perception & Psychophysics*, 61(4), 608-614.
- Miyaoka, T., Mano, T. & Ohka, M. (1999). Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(4), 2485-2492.
- Molinari, H.H., Greenspan, J.D. & Kenshalo, D.R. (1977). The effects of rate of temperature change and adapting temperature on thermal sensitivity. *Sensory Processes*, 1, 354-362.
- Möltner, A., Hölzl, R., Lautenbacher, S., Roscher, R. & Strian, F. (1993). Normwerte und Zuverlässigkeit der Messung von Kälte-, Wärme- und Hitzeschmerz-Schwellen für die Funktionsprüfung kleiner Nervenfasern. *Forschungsbericht Nr. 23*.
- Monkman, G.J. & Taylor, P.M. (1993). Thermal tactile sensing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(3), 313-318.

- Moore, T. V. (1910). The influence of temperature and the electric current on the sensibility of the skin. *The Psychological Review*, 17(2), 347-380.
- Morley, J.W., Goodwin, A.W. & Darian-Smith, I. (1983). Tactile discrimination of gratings. *Experimental Brain Research*, 49, 291-299.
- Munhall, K.G. & Vatikiotis-Bateson, E. (2004). Spatial and temporal constraints on audiovisual speech perception. In: G.A. Calvert, C. Spence & B.E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 177-188). Cambridge: MIT Press.
- Munhall, K.G., Gribble, P., Sacco, L. & Ward, M. (1996). Temporal constraints on the McGurk effect. *Perception & Psychophysics*, 58, 351-362.
- Munhall, K.G., Kroos, C., Jozan, G. & Vatikiotis-Bateson, E. (2004). Spatial frequency requirements for audiovisual speech perception. *Perception & Psychophysics*, 66(4), 574-583.
- Murray, A.M., Klatzky, R.L. & Khosla, P.K. (2003). Psychophysical characterization and test-bed validation of a wearable vibrotactile glove for telemanipulation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(2), 156-182.
- Murray, D.J., Ellis, R.R., Bandomir, C.A. & Ross, H.E. (1999). Charpentier (1891) on the size-weight illusion. *Perception & Psychophysics*, 61(8), 1681-1685.
- Myers, A.K., Cotton, B. & Hilp, H.A. (1981). Matching the rate of concurrent tone bursts and light flashes as a function of flash surround luminance. *Perception & Psychophysics*, 30 (1), 33-38.
- 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.
- Nefs, H.T., Kappers, A.M.I. & Koenderink, J.J. (2002). Frequency discrimination between and within line gratings by dynamic touch. *Perception & Psychophysics*, 64(6), 969-980.
- Nefs, H.T., Kappers, A.M.L. & Koenderink, J.J. (2001). Amplitude and spatial-period discrimination in sinusoidal gratings by dynamic touch. *Perception*, 30, 1263-1274.
- Nicholson, L.L., Adams, R.D. & Maher, C.G. (1997). Reliability of a discrimination measure for judgements of non-biological stiffness. *Manual Therapy*, 2(3), 150-156.
- Nicholson, L.L., Adams, R.D. & Maher, C.G. (2003). Manual discrimination capability when only viscosity is varied in viscoelastic stiffness stimuli. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 26(6), 365-373.
- Nicholson, L.L., Maher, C.G. & Adams, R.D. (1998). Hand contact area, force applied and early non-linear stiffness (toe) in a manual stiffness discrimination task. *Manual Therapy*, 3(4), 212-219.
- Norman, J.F., Todd, J.T., Perotti, V.J. & Tittle, J.S. (1996). The visual perception of three-dimensional length. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(1), 173-186.
- Odgaard, E.C., Arieh, Y. & Marks, L.E. (2004). Brighter noise: Sensory enhancement of perceived loudness by concurrent visual stimulation. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4(2), 127-132.
- Olson, C.L. (1976). On choosing a test statistic in multivariate analysis of variance. *Psychological Bulletin*, 83(4), 579-586.

- Olson, C.L. (1979). Practical considerations in choosing a MANOVA test statistic: A rejoinder to Stevens. *Psychological Bulletin*, 86(6), 1350-1352.
- O'Malley, M.K. & Goldfarb, M. (2002). The implications of surface stiffness for size identification and perceived surface hardness in haptic interfaces. IN: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1255-1260), IEEE Computer Science, Washington DC, USA.
- Onley, J.W. & Volkman, J. (1958). The visual perception of perpendicularity. *The American Journal of Psychology*, 71, 504-516.
- Orban, G.A., Vandebussche, E. & Vogels, R. (1984). Human orientation discrimination tested with long stimuli. *Vision Research*, 24(2), 121-128.
- Oruç, I., Maloney, L.T. & Landy, M.S. (2003). Weighted linear cue combination with possibly correlated error. *Vision Research*, 43, 2451-2368.
- Ottensmeyer, M. & Salisbury, J.K. (1997). Hot and cold running VR: Adding thermal stimuli to the haptic experience. IN: *Proceedings of the PHANToM Users Group, AI Lab Technical Report Nr. 1617* (pp. 34-37).
- Over, R. (1966). An experimentally induced conflict between vision and proprioception. *British Journal of Psychology*, 57, 335-341.
- Overvliet, K.E., Smeets, J.B.J. & Brenner, E. (2004). Can haptic search be parallel? Not when using a cross as a target and circles as distractors. IN: *Proceedings of the 4th International Conference EuroHaptics* (pp. 534-537), TU-München Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Germany, Munich.
- Palmer, S.T., Martin, D.J., Steedman, W.M. & Ravey, J. (2000). C- and A δ -fibre mediated thermal perception: response to rate of temperature change using method of limits. *Somatosensory & Motor Research*, 17(4), 325-333.
- Pang, X.D., Tan, H.Z. & Durlach, N.I. (1991). Manual discrimination of force using active finger motion. *Perception & Psychophysics*, 49(6), 531-540.
- Pashler, H.E. (1998). *The psychology of attention*. Cambridge: MIT Press.
- Patchay, S., Castiello, U. & Haggard, P. (2003). A cross-modal interference effect in grasping objects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10(4), 924-931.
- 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.
- Pentland, A. (1980). Notes and Comment: Maximum likelihood estimation – The best PEST. *Perception & Psychophysics*, 28(4), 377-379.
- Perez, C.A., Holzmann, C.A. & Sandoval, E. (1998). Two point vibrotactile spatial resolution as a function of pulse frequency and pulse width. IN: *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 2542-2545), IEEE Computer Science, Hong Kong Sar, China.
- Petzold, B., Zaeh, M.F., Kron, A., Schmidt, G., Deml, B. & Färber, B. (2004). How to Design a Haptic Telepresence System for the Disposal of Explosive Ordnances. IN: *Proceedings of the International Workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining and Similar Risky Interventions* (pp. 6-11), Brussels-Leuven, Belgium.
- Phillips, J.R. & Matthews, P.B.C. (1993). Texture Perception and Afferent Coding Distorted by Cooling the Human Ulnar Nerve. *The Journal of Neuroscience*, 13(6), 2332-2341.

- Pick, H.L. & Warren, D.H. (1969). Sensory conflict in judgements of spatial direction. *Perception & Psychophysics*, 6(4), 203-205.
- Pinel, J.P.J. (1997). *Biopsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Plaisier, M.A. (2005). *Haptic discrimination of materials using thermal cues*. Internal Report, Helmholtz Instituut Universiteit Utrecht.
- Poling, G.L., Weisenberger, J.M. & Kerwin, T. The Role of Multisensory Feedback in Haptic Surface Perception. IN: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 187- 194), IEEE Computer Science, Los Angeles, California, USA.
- Pollock, W.T. & Chapanis, A. (1952). The apparent length of a line as a function of its inclination. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 170-178.
- Pongrac, H. (2006). Vibrotactile perception: Differential effects of frequency, amplitude, and acceleration. IN: *Proceeding of the IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications* (pp. 54-59), IEEE Computer Society, Ottawa, Ontario, Canada.
- Pongrac, H. *Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, in Vorbereitung.
- Pongrac, H., Leupold, J., Behrendt, S., Färber, B. & Färber, G. (2007). Human factors for enhancing live video streams with virtual reality: Performance, situation awareness and feeling of telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*.
- Pont, S.C., Kappers, A.M.L. & Koenderink, J.J. (1999). Similar mechanisms underlie curvature comparison by static and dynamic touch. *Perception & Psychophysics*, 61(5), 874-894.
- Posner, M.I., Nissen, M.J. & Klein, M.A. (1976). Visual dominance: An information-processing account of its origins and significance. *Psychological Review*, 83(2), 157-171.
- Post, L.J. & Chapman, C.E. (1991). The effects of cross-modal manipulations of attention in detection of vibrotactile stimuli in humans. *Somatosensory & Motor Research*, 8(2), 149-157.
- Power, R.P. (1981). The dominance of touch by vision: occurs with familiar objects. *Perception*, 10, 29-33.
- Preusche, C., Ortmaier, T. & Hirzinger, G. (2002). Teleoperation concepts in minimally invasive surgery. *Control Engineering Practice*, 10, 1245-1250.
- Proffitt, D.R., Bhalla, M., Gossweiler, R. & Midgett, J. (1995). Perceiving geographical slant. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(4), 409-428.
- Provins, K. A. & Morton, R. (1960). Tactile discrimination and skin temperature. *Journal of Applied Physiology*, 15, 155-160.
- Purdy, K.A., Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (2004). Haptic processing of the location of a known property: Does knowing what you've touched tell you where it is? *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 58(1), 32-45.
- Radeau, M. & Bertelson, P. (1987). Auditory-visual interaction and the timing of inputs. *Psychological Research*, 49, 17-22.
- Raffel, G. (1936). Visual and kinaesthetic judgments of length. *The American Journal of Psychology*, 48, 331-334.

- Raj, D.V., Ingty, K. & Devanandan, M.S. (1985). Weight appreciation in the hand in normal subjects and in patients with leprosy neuropathy. *Brain*, 108, 95-102.
- Rao, A.K. & Gordon, A.M. (2001). Contribution of tactile information to accuracy in pointing movements. *Experimental Brain Research*, 138, 438-445.
- Reed, C.L., Lederman, S.J. & Klatzky, R.L. (1990). Haptic integration of planar size with hardness, texture and planar contour. *Canadian Journal of Psychology*, 44(4), 522-545.
- Reintsema, D., Preusche, C., Ortmaier, T., Hirzinger, G. (2004). Toward High-Fidelity Telepresence in Space and Surgery Robotics. *Presence: Teleoperators and virtual Environments*, 13(1), S. 77 - 98
- Rinkenauer, G., Mattes, S. & Ulrich, R. (1999). The surface-weight illusion: On the contribution of grip force to perceived heaviness. *Perception & Psychophysics*, 61(1), 23-30
- Rinker, M.A., Craig, J.C. & Bernstein, L.E. (1998). Amplitude and period discrimination of haptic stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(1), 453-463.
- Robles-De-La-Torre, G. & Hayward, V. (2001). Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, 412, 445-448.
- Rock, I. & Harris, C.S. (1967). Vision and Touch. *Scientific American*, 216, 96-104.
- Rock, I. & Victor, J. (1964). Vision and Touch: An experimentally created conflict between the Two Senses. *Science*, 143, 594-596.
- Roland, P.E. & Ladegaard-Pedersen, H. (1977). A quantitative analysis of sensations of tension and of kinesthesia in man - Evidence of a peripherally originating muscular sense and for a sense of effort. *Brain*, 100, 671-692.
- Rosas, P., Wagemans, J., Ernst, M.O. & Wichmann, F.A. (2005). Texture and haptic cues in slant discrimination: reliability-based cue weighting without statistically optimal cue combination. *Journal of the Optical Society of America*, 22(5), 801-809.
- Ross, H.E. & Reschke, M.F. (1982). Mass estimation and discrimination during brief periods of zero gravity. *Perception & Psychophysics*, 31(5), 429-436.
- Rossetti, Y., Rode, G. & Boisson, D. (1995). Implicit processing of somesthetic information: A dissociation between where and how? *NeuroReport*, 6, 506-510.
- Rothenberg, M., Verrillo, R.T., Zahorian, S.A., Brachman, M.L. & Bolanowski, S.J. (1977). Vibrotactile frequency for encoding a speech parameter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(4), 1003-1012.
- Rózsa, A.J., Molinari, H.M., Greenspan, J.D. & Kenshalo, D.R. (1985). The primate as a model for the human temperature-sensing system: 1. Adapting temperature and intensity of thermal stimuli. *Somatosensory Research*, 2(4), 303-314.
- Russell, R.A. (1984). Thermal Touch Sensing. *Journal of Electrical and Electronics Engineering Australia*, 4(1), 68-70.
- Rymer, W.Z. & D'Almeida, A. (1980). Joint position sense: The effects of muscle contraction. *Brain*, 103, 1-22.
- Sadowski, W. & Stanney, K. (2002). Presence in virtual environments. IN: K.M. Stanney (Ed.), *Handbook of virtual environments - Design, implementation, and application* (pp. 791-806). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Saldaña, H.M. & Rosenblum, L.D. (1993). Visual influence on auditory pluck and bow judgements. *Perception & Psychophysics*, 54(3), 406-416.

- Salmoni, A.W. & Sullivan, S.J. (1976). The intersensory integration of vision and kinesthesia for distance and location cues. *Journal of Human Movement Studies*, 2, 225-232.
- Sathian, K. & Burton, H. (1991). The role of spatially selective attention in the tactile perception of texture. *Perception & Psychophysics*, 50(3), 237-248.
- Scheucherpflug, R. (2001). Measuring presence in virtual environments. IN: *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 56-58), New Orleans, Louisiana, USA.
- Schmidt, R.F. (1973). Somato-viszerale Sensibilität. IN: R.F. Schmidt (Hrsg.), *Grundriß der Sinnesphysiologie* (S. 42-94). Berlin: Springer-Verlag.
- Schmidt, R.F. & Schaible, H.-G. (2001). *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Berlin: Springer-Verlag
- Schmidt R.F. & Thews (1983). *Physiologie des Menschen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Schubert, T., Friedman, F. & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266-281.
- Scott-Blair, G.W. & Copen, F.M.V. (1939). The subjective judgement of the elastic and plastic properties of soft bodies; the "differential thresholds" for viscosities and compression moduli. *Proceedings of the Royal Society of London*, 128B, 109-125.
- Scott-Blair, G.W. & Copen, F.M.V. (1940). The subjective judgement of the elastic and plastic properties of soft bodies. *British Journal of Psychology*, 31, 61-79.
- Scott-Blair, G.W. (1954). The subjective assessment of firmness. *Laboratory Practice*, 3, 3-9.
- Shams, L., Kamitani, Y. & Shimojo, S. (2000). What you see is what you hear. *Nature*, 408, 788.
- Shelton, B.R., Picardi, M.C. & Green, D.M. (1982). Comparison of three adaptive psychophysical procedures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 71(6), 1527-1533.
- 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), 120-126.
- Sheridan, T.B. (1996). Further Musings on the Psychophysics of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(2), 241-246.
- Sherrick, C.E. & Cholewiak, R.W. (1986). Cutaneous Sensitivity. IN: R.K. Boff, L. Kaufman & J.B. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance – Sensory Processes and Perception* (chapter 12). New York: Wiley and Sons.
- Shiffrin, R.M., Craig, J.C. & Cohen, E. (1973). On the degree of attention and capacity limitation in tactile processing. *Perception & Psychophysics*, 13(2), 328-336.
- Shimoga, K.B. (1993). A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part I. Finger Force Feedback. IN: *Proceedings of the 1993 International Symposium on Virtual Reality* (pp.263-270), IEEE Computer Science, Seattle, Washington, USA.
- Shimojo, S. & Shams, L. (2001). Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions. *Current Opinion in Neurobiology*, 11, 505-509.
- Sinclair, R.J. & Burton, H. (1991). Tactile discrimination of gratings: Psychophysical and neural correlates in human and monkey. *Somatosensory & Motor Research*, 8(3), 241-248.

- Sinclair, R.J. & Burton, H. (1996). Discrimination of vibrotactile frequencies in a delayed pair comparison task. *Perception & Psychophysics*, 58(5), 680-692.
- Sinclair, R.J., Kuo, J.J. & Burton, H. (2000). Effects on discrimination performance of selective attention to tactile features. *Somatosensory & Motor Research*, 17(2), 145-157.
- 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.
- Snippe, H.P. & Koenderink, J.J. (1994). Discrimination of geometric angle in the fronto-parallel plane. *Spatial Vision*, 8(3), 309-328.
- Soto-Faraco, S., Lyons, J., Gazzaniga, M., Spence, C. & Kingstone, A. (2002). The ventriloquist in motion: Illusory capture of dynamic information across sensory modalities. *Cognitive Brain Research*, 14, 139-146.
- Spence, C. (2002). Multisensory attention and tactile information-processing. *Behavioural Brain Research*, 135, 57-64.
- Spence, C., Nicholls, M.E.R. & Driver, J. (2001). The cost of expecting events in the wrong sensory modality. *Perception & Psychophysics*, 63(2), 330-336.
- Spence, C., Pavani, F. & Driver, J. (2004). Spatial constraints on visual-tactile cross-modal distractor congruency effects. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4(2), 148-169.
- Spray, D.C. (1986). Cutaneous temperature receptors. *Annual Review of Physiology*, 48, 625-638.
- Srinivasan, M.A. & La Motte, R.H. (1995). Tactual Discrimination of Softness. *Journal of Neurophysiology*, 73(1), 88-101.
- Srinivasan, M.A., Beauregard, G.L. & Brock, D.L. (1996). The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments. IN: *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division DSC 58* (pp. 555-559), The American Society of Mechanical Engineers.
- Srinivasan, M.A., Whitehouse, M.J. & LaMotte, R.H. (1990). Tactile Detection of Slip: Surface Microgeometry and Peripheral Neural Codes. *Journal of Neurophysiology*, 63 (6), 1323-1332.
- Stanney, K.M. (2002). *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and application*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Stanney, K.M., Mourant, R.R. & Kennedy, R.S. (1998). Human factors issues in virtual environments: A review of the literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4), 321-351.
- Stein, B.E. & Meredith, M.A. (1993). *The merging of the senses*. Cambridge: MIT Press.
- Stein, B.E., London, N., Wilkinson, L.K. & Price, D.D. (1996). Enhancement of perceived visual intensity by auditory stimuli: A psychophysical analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(6), 497-506.
- Steinmetz, M.A., Romo, R. & Mountcastle, V.B. (1989). Cortical neuronal mechanisms for frequency discrimination in the somesthetic sense of flutter. IN: O. Franzén, & J. Westman, (Eds.), *Information processing in the somatosensory system* (pp. 289-304). New York: Stockton Press.

- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73-93.
- Stevens, J. C., Green, B. G. & Krimsley, A. S. (1977). Punctate Pressure Sensitivity: Effects of Skin Temperature. *Sensory Processes*, 1, 238-243.
- Stevens, J.C. & Choo, K.K. (1998). Temperature sensitivity of the body surface over the life span. *Somatosensory & Motor Research*, 15(1), 13-28.
- Stevens, J.C. & Green, B.G. (1978). Temperature - Touch Interaction: Weber's Phenomenon Revisited. *Sensory Processes*, 2, 206-219.
- Stevens, J.C. & Hooper, J.E. (1982). How skin and object temperature influence touch sensation. *Perception & Psychophysics*, 32(3), 282-285.
- Stevens, J.C. (1979). Thermal Intensification of Touch Sensation: Further Extensions of the Weber Phenomenon. *Sensory Processes*, 3, 240-248.
- Stevens, J.C. (1982). Temperature can sharpen tactile acuity. *Perception & Psychophysics*, 31(6), 577-580.
- Stevens, J.C. (1991). Thermal sensibility. IN: M.A. Heller & W. Schiff (Eds.), *The psychology of touch* (pp. 61-91). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Stevens, J.C. (1998). Temperature and the Two-Point Threshold. *Somatosensory & Motor Research*, 6(3), 275-284.
- Stevens, S.S. & Stone, G. (1959). Finger span: Ratio scale, category scale, and jnd scale. *Journal of Experimental Psychology*, 57(2), 91-95.
- Stevens, S.S. (1960). Ratio scales, partition scales and confusion scales. IN: H. Gulliksen & S. Messik (Eds.), *Psychological scaling: Theory and applications* (pp. 59-65). New York: John Wiley & Sons.
- Stevens, S.S. (1975). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. New York: John Wiley & Sons.
- Sullivan, A.H. (1927). The cutaneous perception of softness and hardness. *Journal of Experimental Psychology*, 10, 447-462
- Tan, H. Z., Durlach, N. I., Beauregard, G. L. & Srinivasan, M. A (1995). Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues. *Perception & Psychophysics*, 57(4), 495-510.
- Tan, H. Z., Durlach, N.I., Shao, Y. & Wei, M. (1993). Manual resolution of compliance when work and force cues are minimized. IN: *Proceedings of the ASME Dynamics and Control Division DSC 49* (pp. 99-104), The American Society of Mechanical Engineers.
- Tan, H.Z., Pang, X.D. & Durlach, N.I. (1992). Manual resolution of length, force, and compliance. IN: H. Kazerooni (Ed.), *Advances in Robotics DSC 42* (pp. 13-18), The American Society of Mechanical Engineers.
- Tanner, W.P. & Swets, J.A. (1954). A decision-making theory of visual detection. *Psychological Review*, 61(6), 401-409.
- Taylor, M.M. & Creelman, C.D. (1967). PEST: Efficient estimates on probability functions. *The Journal fo the Acoustical Society of America*, 41(4), 782-787.
- Taylor, M.M. & Lederman, S.J. (1975). Tactile roughness of grooved surfaces: A model and the effect of friction. *Perception & Psychophysics*, 17(1), 23-26.

- Taylor, R.L. & Campbell, G.T. (1976). Sensory interaction: Vision is modulated by hearing. *Perception*, 5, 467-477.
- Treisman, A. & Gelade (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-143.
- Treisman, A. & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95(1), 15-48.
- Treisman, A. & Schmidt, H. (1982). Illusory conjunctions in the perception of objects. *Cognitive Psychology*, 14, 107-141.
- Treisman, A. & Souther, J. (1985). Search asymmetry: A diagnostic for preattentive processing of separable features. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114(3), 285-310.
- Treisman, A. (1986). Properties, parts, and objects. IN: K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas, (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance – Cognitive Processes and Performance* (chapter 35).
- Tressoldi, P.E. (1989). Hemisphere and information control by the two cerebral hemispheres: which interaction? *Brain & Cognition*, 10, 44-53.
- Treutwein, B. (1995). Adaptive Psychophysical Procedures: a Review. *Vision Research*, 35(17), 2503-2522.
- Turner, M.L., Gomez, D.H., Tremblay, M.R. & Cutkosky (1998). Preliminary tests on an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation. Proceedings of the ASME IMECE 7th Annual Symposium on Haptic Interfaces (pp. 145-149), The American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, California, USA.
- Uhlarik, J.J. & Canon, L.K. (1971). Influence of concurrent and terminal exposure conditions on the nature of perceptual adaptation. *Journal of Experimental Psychology*, 91(2), 233-239.
- Valbo, A.B. & Johansson, R.S. (1984). Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand Related to Touch Sensation. *Human Neurobiology*, 3(1), 3-14.
- Van Beers, R.J. , Sittig, A.C. & Denier van der Gon, J.J. (1998). The precision of proprioceptive position sense. *Experimental Brain Research*, 122, 367-377.
- Van Beers, R.J., Sittig, A.C. & Denier van der Gon, J.J. (1996). How humans combine simultaneous proprioceptive and visual position information. *Experimental Brain Research*, 111, 253-261.
- Van Beers, R.J., Sittig, A.C. & Denier van der Gon, J.J. (1999). Integration of Proprioceptive and Visual Position-Information: An Experimentally Supported Model. *Journal of Neurophysiology*, 81, 1355-1364.
- Van Doren, C.L. (1989). A model of spatiotemporal tactile sensitivity linking psychophysics to tissue mechanics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(5), 2065-2080.
- Van Wassenhove, V., Grant, K.W. & Poeppel, D. (2002). Temporal Integration in the McGurk Effect. *Cognitive Neuroscience Annual Meeting*, San Francisco, California, USA.
- Velden, M. (1982). *Die Signalentdeckungstheorie in der Psychologie*. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.
- Vendrik, A.J.H. (1970). Psychophysics of the thermal sensory system and statistical detection theory. IN: J.D. Hardy, A.P. Gagge & J.A.J. Stolwijk (Eds.), *Physiological and behavioral temperature regulation* (pp. 819-830). Springfield: Charles C. Thomas Publication.

- Verrillo, R. T. & Bolanowski, S. J. (1986). The effects of skin temperature on the psychophysical responses to vibration on glabrous and hairy skin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 80(2), 528-532.
- Verrillo, R. T. & Bolanowski, S. J. (2003). Effects of temperature on the Participative magnitude of vibration. *Somatosensory & Motor Research*, 20(2), 133-137.
- Verrillo, R.T. (1963). Effect of Conactor Area on the Vibrotactile Threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(12), 1962-1966.
- Verrillo, R.T. (1985). Psychophysics of vibrotactile stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(1), 225-232.
- Voisin, J., Benoit, G. & Chapman, C.E. (2002a). Haptic discrimination of object shape in humans: two-dimensional angle discrimination. *Experimental Brain Research*, 145, 239-250.
- Voisin, J., Benoit, G. & Chapman, C.E. (2002b). Haptic discrimination of object shape in humans: contribution of cutaneous and proprioceptive inputs. *Experimental Brain Research*, 145, 251-260.
- Volčič, R. Kappers, A.M.L. & Koenderink, J.J. (in press). Haptic parallelity perception on the frontoparallel plane: An involvement of reference frames. *Perception & Psychophysiscs*.
- Vroomen, J. & De Gelder, B. (2004). Perceptual effects of cross-modal stimulation: Ventriloquism and the freezing phenomenon. IN: G.A. Calvert, C. Spence & B.E. Stein (Eds.), *The handbook of mulitsensory processes* (pp. 141-150). Cambridge: MIT Press.
- Wagner, C.R., Perrin, D.P., Feller, R.L., Howe, R.D., Clatz, O., Delingette, H. & Ayache, N. (2005). Integrating tactile and force feedback with finite element models. IN: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3942-3047), IEEE Computer Science, Barcelona, Spain.
- Wall, S.A. & Brewster, S.A. (2003). Scratching the Surface: Preliminary Investigations of Haptic Properties for Data Representation. IN: *Proceedings of the 3rd International Conference Eurohaptics* (pp. 330-342), Dublin, Ireland.
- Wall, St.A., Paynter, K., Shillito, A.M., Wright, M. & Scali, S. (2002) The Effect of Haptic Feedback and Stereo Graphics in a 3D Target Acquisition Task. IN: *Proceedings of the 2nd International Conference EuroHaptics* (pp. 23-29), Edinburgh, UK.
- Wang, S. (1979). Modes of haptic perception and length discrimination. *Acta Sinica*, 11(1), 55-64.
- Warren, D.H. & Pick, H.L. (1970). Intermodality relations in localization in blind and sighted people. *Perception & Psychophysiscs*, 8(6), 430-432.
- Warren, D.H. & Rossano, M.J. (1991). Intermodality Relations: Vision and Touch. IN: M.A. Heller & W. Schiff (Eds.), *The Psychology of Touch* (pp. 119-139). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Warren, D.H. & Schmidt, T.L. (1978). On the plasticity of visual-proprioceptive bias effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 4(2), 302-310.
- Warren, D.H. (1980). Response factors in intermodality localization under conflict conditions. *Perception & Psychophysiscs*, 27(1), 28-32.
- Weber, E.H. (1846). Der Tastsinn und das Gemeingefühl IN: R. Wagner (Ed.), *Handwörterbuch der Physiologie mit Rücksicht auf die physiologische Pathologie* (pp. 481-588). Braunschweig: Vieweg & Sohn.

- Weene, P. & Held, R. (1966). Changes in perceived size of angle as a function of orientation in the frontal plane. *Journal of Experimental Psychology*, 71(1), 55-59.
- Weinstein, S. (1968). Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality. IN: D.R. Kenshalo (Ed.). *The Skin Senses* (pp. 195-222). Springfield: Charles C. Thomas Publishers.
- Weitz, J. (1941). Vibratory sensitivity as a function of skin temperature. *Journal of Experimental Psychology*, 28, 21-36.
- Welch, R.B. & Warren, D.H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychological Bulletin*, 88(3), 638-667.
- Welch, R.B. & Warren, D.H. (1986). Intersensory Interactions. IN: Boff, K.R., Kaufman, L. & Thomas, J.P. (Eds.). *Handbook of Perception and Human Performance – Sensory Processes and Perception* (chapter 25). New York: J. Wiley & Sons.
- Welch, R.B., Widawski, M.H., Harrington, J. & Warren, D.H. (1979). An examination of the relationship between visual capture and prism adaptation. *Perception & Psychophysics*, 25(2), 126-132.
- Wermuth, S. (1998). Quantitative Untersuchung des Realitätseindrucks von multimedialen visuell-haptischen Telepräsenzsystemen. Nicht veröffentlichte Studienabschlussarbeit, Technische Universität München.
- Whang, K.C., Burton, H. & Shulman, G.L. (1991). Selective attention in vibrotactile tasks: Detecting the presence and absence of amplitude change. *Perception & Psychophysics*, 50(2), 157-165.
- Wichmann, F.A. & Hill, N.J. (2001a). The psychometric function: I. Fitting, samples, and goodness of fit. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1293-1303.
- Wichmann, F.A. & Hill, N.J. (2001b). The psychometric function: II. Bootstrap-based confidence intervals and sampling. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1314-1329.
- Wijntjes, M.W.a. & Kappers, A.M.I. (2006). What influences angular acuity in raised line drawings? IN: *Proceedings of the 5th International Conference EuroHaptics* (pp. 333-338), Paris, France.
- Williams, W.N., Schmidt Hanson, C., Crary, M.A. & Wharton, P.W. (1991). Human pinch-force discrimination. *Perceptual and Motor Skills*, 73, 663-672.
- Witmer, B.G. & Singer, M.J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240.
- Woods, A.T., O'Modhrain, S. & Newell, F.N. (2004). The effect of temporal delay and spatial differences on cross-modal object recognition. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(2), 260-269.
- Woods, T.M. & Recanzone, G.H. (2004). Cross-modal interactions evidenced by the ventriloquism effect in humans and monkeys. IN: G.A. Calvert, C. Spence & B.E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 35-48). Cambridge: MIT Press.
- Wu, W.-C., Basdogan, C. & Srinivasan, M.A. (1999). Visual, Haptic, and Bimodal Perception of Size and Stiffness in Virtual Environments. IN: *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division DSC 67* (pp. 19-26), The American Society of Mechanical Engineers.
- Wuillemin, D., VanDoorn, G., Richardson, B. & Symmons, M. (2005). Haptic and Visual Size Judgements in Virtual and Real Environments. IN: *Proceedings of the 1st Joint Eurohaptics*

Conference and Symposium on Haptic Interfaces and Teleoperator Systems, IEEE Computer Society, Pisa, Italy, 86-89.

Yamakawa, S., Fujimoto, H., Manabe, S. & Kobayashi, Y. (2005). The Necessary Conditions of the Scaling Ratio in Master-Slave Systems Based on Human Difference Limen of Force Sense. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 35(2), 275-282.

Yamamoto, A., Cros, B., Hashimoto, H. & Higuchi, T. (2004). Control of thermal tactile display based on prediction of contact temperature. IN: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1536- 1541), IEEE Computer Science, New Orleans, Louisiana, USA.

Yarnitsky, D. & Ochoa, J.L. (1991). Warm and cold specific somatosensory systems. *Brain*, 114, 1819-1826.

Yoshioka, T., Gibb, B., Dorsch, A.K., Hsiao, S.S. & Johnson, K.O. (2001). Neural coding mechanisms underlying perceived roughness of finely textured surfaces. *The Journal of Neuroscience*, 21(17), 6905-6916.

Zäh, M.F., Petzold, B., Anton, O., Ehrenstraßer, M. & Schilp, J. (2002). Telepräsenz und Teleaktion in der Mikrosystemtechnik: System zur Analyse und Bewertung zu unterstützender Fertigkeiten. *Proceedings of the 1st International Workshop on Human-Centered Robotic Systems* (pp. 91-96), TU München, Munich, Germany.

Zimmerman, R.J. & Stevens, J.C. (1982). Temperature-touch interactions: Is there a reverse Weber phenomenon? *Bulletin of the Psychonomic Society*, 19(2), 269-270.

Zuidhoek, S., Kappers, A.M.L. & Postma, A. (2007). Haptic orientation perception: Sex differences and lateralization of functions. *Neuropsychologia*, 45(2), 332-341.

Zuidhoek, S., Kappers, A.M.L., van der Lubbe, R.H.J. & Postma, A. (2003). Delay improves performance on a haptic spatial matching task. *Experimental Brain Research*, 149, 320-330.

Zuidhoek, S., Visser, A., Bredero, M.E. & Postma, A. (2004). Multisensory integration mechanisms in haptic space perception. *Experimental Brain Research*, 157, 265-268.