

Effizienz und Ergonomie von Multitouch-Interaktion

Studien und Prototypen zur Bewertung und Optimierung
zentraler Interaktionstechniken

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultäten

vorgelegt von
Chi Hoang Quan Nguyen

Saarbrücken, den 2. November 2015

Datum des Kolloquiums:

07.12.2015

Dekan:

Prof. Dr. Markus Bläser

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Philipp Slusallek

Gutachter:

Prof. Dr. Michael Kipp

Prof. Dr. Antonio Krüger

Akademischer Beisitzer:

Dr. Tim Schwartz

Danksagung

Großer Dank gebührt zuerst meinem Doktorvater **Michael Kipp** nicht nur für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit, sondern auch dafür, dass er mich erst auf diesen Weg gebracht hat. Ohne seinen Rückhalt und seine moralische sowie fachliche Unterstützung über die ganzen Jahre wäre diese Arbeit nie entstanden.

Ebenso möchte mich herzlich bei **Antonio Krüger** für seine frühe Zusage bedanken, das Zweitgutachten dieser Arbeit zu verfassen.

Auch möchte ich mich bei Herrn **Wolfgang Wahlster** für die erfolgreiche Zeit bedanken, die ich als Mitarbeiter am DFKI in seinem Fachbereich verbringen durfte.

Ein großer Dank geht auch an **Angela Castronovo** und **Benedict Fehring** sowie Herrn **Markus Pospeschill**, die mich zu Fragen rund um die statistische Auswertung beraten haben und sich auch die Zeit genommen haben, diese mit mir zu diskutieren.

Ich danke meinem Freund **Dat Nguyen**, der mich als ehemaliger HiWi bei der Programmierung der Analysetools und den Annotationen für die Videoanalyse unterstützt hat.

Herzlichen Dank an die **Mitarbeiter des Lehrstuhls für Künstliche Intelligenz** für die familiäre Atmosphäre und die tolle Unterstützung, die ich in meiner Zeit dort erfahren durfte – insbesondere in der Zeit nach EMBOTS.

Von der *Graduate School of Computer Science Saarbrücken* möchte ich ganz besonders Frau **Michelle Carnell** für die Ermöglichung zahlreicher Seminare und Fortbildungen danken, die für meine Arbeit sehr hilfreich waren.

Ebenso gebührt mein Dank allen **Studienteilnehmern** für die Teilnahme bei den Studien. Ohne ihr Engagement wäre die Arbeit nicht möglich gewesen. Insbesondere möchte ich hierbei meinem Bruder **Lloyd** für seine ständige Bereitschaft, sich als Versuchsperson und Tester zur Verfügung zu stellen, danken.

Für das abschließende und kurzfristige Korrekturlesen möchte ich mich ganz herzlich bei **Marcus Bettstetter** und meinen Schwestern **Nguyet** und **Nhung** bedanken. Ihre Sichtweise als Fachfremde war goldwert.

Meiner *Ziehtochter* **Aline** möchte ich für ihre besondere Art der Motivation und ihr Verständnis danken, dass ich in den letzten Monaten so wenig Zeit für sie hatte.

Mein tiefer Dank gilt zum Schluss meiner Frau **Johanna**. Zum einen für ihr konstruktives Feedback und die fruchtbaren Diskussionen mit ihr, die einen wichtigen Teil zur Qualität dieser schriftlichen Ausarbeitung beigetragen haben. Aber vor allen Dingen für ihre bedingungslose Unterstützung, insbesondere während der intensiven und stressigen Endphase meiner Dissertation.

Con cảm ơn ba má

For my parents

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Grundfragen der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit von Multitouch-Interaktionen. Mithilfe einer Multitouch-Steuerung für 3D-Animation konnte gezeigt werden, dass selbst unerfahrene Multitouch-Nutzer in der Lage sind, hoch komplexe Aufgaben koordiniert und effizient zu lösen. Ein neu entwickeltes Koordinationsmaß bestätigt, dass Nutzer den Vorteil eines Multitouch nutzen, indem sie koordiniert mehrere Finger gleichzeitig für 3D-Animationen in Echtzeit einsetzen.

In drei weiteren Studien zu zentralen Multitouch-Interaktionstechniken konnte gezeigt werden, dass die Originalformulierung von Fitts' Gesetz nicht ausreicht, um die Effizienz von Multitouch-Interaktionen adäquat zu bewerten und zu analysieren. Fitts' Gesetz ist ein Modell zur Vorhersage und Analyse von Interaktionszeiten und beinhaltet ursprünglich nur die Distanz der Interaktionsbewegung und die Zielgröße. Diese Arbeit zeigt, dass Vorhersagen mit Fitts' Gesetz bessere Ergebnisse liefern, wenn sie neben diesen beiden Faktoren auch Bewegungsrichtung, Startpunkt der Bewegung und Neigung des Multitouch-Display berücksichtigen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern Anhaltspunkte, um effiziente und benutzerfreundliche Interaktionstechniken zu entwickeln. Zudem könnten sie eingesetzt werden, um Analysen von Intertaktionstechniken für Multitouch teilautomatisch durchzuführen.

Abstract

This thesis deals with fundamental questions of efficiency, effectiveness and satisfaction of multitouch interactions. Using a novel multitouch interface for 3D animation it could be shown that even inexperienced multitouch users are capable of solving highly complex tasks in a coordinated and efficient way. A newly developed measure for coordination confirms that users take advantage of multitouch by using several fingers simultaneously to create a 3D real-time animation.

In three additional studies on central interaction techniques for multitouch it was shown that the original Fitts' law is not sufficient to adequately describe and analyse the efficiency of multitouch interactions. Fitts' law is a model for the prediction and analysis of interaction time which originally only takes into account the distance of interaction movements and the target size. This work shows that predictions based on Fitts' law provide better results when, in addition to these two factors, the direction of the movement, the starting point and the tilt of the display are considered, as well.

The present results provide approaches to developing efficient interaction techniques with high usability. Furthermore, they can be used to conduct a semi-automatic analysis of interaction techniques for multitouch.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	vii
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
1.1. Multitouch oder eine (noch) unvollendete Erfolgsgeschichte	1
1.2. Motivation	5
1.2.1. Persönliche Motivation	5
1.2.2. Konkrete Anwendung	6
1.3. Herausforderungen	7
1.4. Forschungsfragen	9
1.5. Aufbau dieser Arbeit	11
2. Grundlagen	13
2.1. Interaktionstechnik	13
2.1.1. Begriffserklärungen	13
2.1.2. Konzepte	15
2.1.3. Interaktionsaufgabe	19
2.2. Quantitative Analysen	21
2.2.1. Fitts' Gesetz: Die Grundlage der quantitativen Analysen	22
2.2.2. Performanz vs. Effizienz	29
2.2.3. Fazit	34
2.3. Skelettbasierte Animation	34
2.3.1. Animationstechniken	34
2.3.2. Aufbau eines Skelettes	35
2.3.3. Manipulation eines Skelettes	36
3. Verwandte Arbeiten	39
3.1. Vorhersagemodelle	39
3.1.1. Allgemeine Vorhersagemodelle	39
3.1.2. Anpassungen an Fitts' Gesetz	43
3.1.3. Fazit	49
3.2. Multitouch	50
3.2.1. Interaktionsaufgaben	50
3.2.2. Interaktionstechniken	59

3.2.3.	Interaktionskontext	65
3.2.4.	Fazit	70
3.3.	Koordinationsmaß	70
3.3.1.	Fazit	73
3.4.	Kinematische Ketten	74
3.4.1.	Performanz von kinematischen Ketten	74
3.4.2.	Ermüdung von kinematischen Ketten	76
3.4.3.	Fazit	78
3.5.	Animationssysteme	80
3.5.1.	Fazit	85
4.	Koordinierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden	87
4.1.	Einleitung	87
4.2.	Studie	89
4.2.1.	Aufgabe	89
4.2.2.	Interface-Design	92
4.2.3.	Grafische Benutzeroberfläche	92
4.2.4.	Eingabe-Interfaces	95
4.2.5.	Versuchspersonen	101
4.2.6.	Ausrüstung und Material	101
4.2.7.	Versuchsplan	103
4.2.8.	Durchführung	104
4.3.	Ergebnisse	105
4.3.1.	Effizienz	105
4.3.2.	Koordination	107
4.3.3.	Fragebogen und Interviews	109
4.3.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse	109
4.4.	Diskussion	110
4.5.	Zusammenfassung	115
5.	Vergleich von Translation und Rotation	117
5.1.	Einleitung	117
5.2.	Studie	118
5.2.1.	Aufgabe	118
5.2.2.	Versuchspersonen	121
5.2.3.	Ausrüstung und Material	121
5.2.4.	Versuchsplan	123
5.2.5.	Durchführung	124
5.3.	Ergebnisse	126
5.3.1.	Bereinigung der Durchführungszeiten	126
5.3.2.	Regressionsanalyse	126
5.3.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse	128
5.4.	Diskussion	128
5.5.	Zusammenfassung	130
6.	Schwierigkeit und Effizienz von Rotation und Translation	133

6.1. Einleitung	133
6.2. Studie	134
6.2.1. Aufgabe	136
6.2.2. Versuchspersonen	137
6.2.3. Ausrüstung und Material	137
6.2.4. Versuchsplan	138
6.2.5. Durchführung	138
6.3. Ergebnisse	140
6.3.1. Effizienz	140
6.3.2. Reaktionszeit	140
6.3.3. Regressionsanalyse	142
6.3.4. Strategien	143
6.3.5. Fragebogen	145
6.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse	145
6.4. Diskussion	146
6.5. Zusammenfassung	149
7. Performanz und Ergonomie von Translation	151
7.1. Einleitung	151
7.2. Studie	152
7.2.1. Aufgabe	153
7.2.2. Versuchspersonen	154
7.2.3. Ausrüstung und Material	155
7.2.4. Versuchsplan	156
7.2.5. Durchführung	157
7.3. Ergebnisse	160
7.3.1. Performanz	160
7.3.2. Anpassung von Fitts' Gesetz	167
7.3.3. Kinematische Ketten	169
7.3.4. Fragebogen und Interview	170
7.3.5. Beobachtungen der Versuchsleitung	171
7.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse	173
7.4. Diskussion	174
7.5. Zusammenfassung	183
8. Zusammenfassung	185
8.1. Abschließende Diskussion	185
8.2. Zukünftige Arbeiten	193
8.3. Abschließende Bemerkung	195
Literatur	197
Abbildungsverzeichnis	215
Tabellenverzeichnis	219
Anhang	223

A. Koordinierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden	223
B. Vergleich von Translation und Rotation	237
C. Schwierigkeit und Effizienz von Rotation und Translation	241
D. Performanz und Ergonomie von Translation	245

KAPITEL 1

Einleitung

„I'll be brave, in five years we'll have many tens of million of people sitting browsing their photos, browsing their music, organising their lives using this type of touch interface.“

Bill Gates, 2008, CEO Summit

1.1. Multitouch oder eine (noch) unvollendete Erfolgsgeschichte

Berührungsempfindliche Displays zur Bedienung von Computersystemen sind im Alltag kaum mehr wegzudenken – ob als Single-Touch, der Eingabe mit maximal einem Berührungspunkt (Finger), oder als Multitouch mit mehreren Berührungspunkten (mehrere Finger). In der Öffentlichkeit werden beispielsweise Ticketautomaten mittlerweile ausschließlich mit Touch-Displays bedient (siehe Abbildung 1.1a). In Museen oder bei Ausstellungen werden Multitouch-Displays eingesetzt, um die Inhalte zu präsentieren (siehe Abbildung 1.1b). Mehrere Besucher können dabei gleichzeitig Wissen abrufen und interaktiv erleben. Im Privaten werden überwiegend nur noch Mobiltelefone gekauft, die mindestens ein Touch-Display aufweisen. Aber auch im Auto, wie zum Beispiel bei der Bedienung von Fahrzeugeinstellungen oder Navigation, bei Fernbedienungen, Herd oder sogar Backöfen werden Touch-Oberflächen verwendet, damit der Benutzer die benötigten Eingaben durchführen kann. Touch-Eingaben gelten als intuitiv, da der Benutzer das Objekt direkt *berühren* und die Bedienung der *Benutzerschnittstellen (User Interface, UI)* aufgrund seiner Erfahrungen aus der realen Welt ableiten kann (Reisman et al., 2009; Shneiderman, 1982).

Beachtet man die Geschichte des Multitouch, so war der Erfolg nicht vorherzusehen. Denn die ersten Publikationen, die sich mit Multitouch-Displays befassten, wurden schon 1985 veröffentlicht (Lee et al., 1985) und gipfelten im imponierenden TED-Vortrag von



(a) Kartenautomat

(b) Museum

Abbildung 1.1.: (Multi-)Touch-Geräte im Alltag. Öffentliche Ticketautomaten sind mit Touch-Oberflächen ausgestattet (a). Das Schlossmuseum Linz verwendet Multitouch-Tische zur interaktiven Darstellung von Wissensinhalten (b).

Jeff Han¹ im Jahre 2006. In seiner Präsentation demonstrierte Jeff Han die Stärken eines Multitouch-Display und präsentierte zahlreiche Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten. Trotz der jahrelangen Forschung scheiterten dennoch die ersten Versuche, touch- bzw. multitouchfähige Geräte im Geschäfts- und Privatbereich zu etablieren. Dazu gehörten die sogenannten *Personal Digital Assistants* (PDA, persönlicher digitaler Assistent), die überwiegend zur persönlichen Kalender-, Adress- und Aufgabenverwaltung eingesetzt wurden. Hierbei wurde versäumt, das komplette Betriebssystem auf Touch-Eingaben auszulegen. In der Konsequenz war man als Haupteingabemedium auf einen Stift (Stylus) angewiesen, der im Grunde nur die Maus ersetzte (siehe Abbildung 1.2).



Abbildung 1.2.: PDA-Eingabe per Stift (Stylus). Aufgrund der kleinen Elemente mussten PDAs mit einem Stylus bedient werden, die den Mauszeiger simulierten.

Der kommerzielle Durchbruch der Multitouch-Technologie gelang erst Apple nach mehr als 20 Jahren Forschung mit der Produkteinführung des iPhone 2007. Hier wurde erstmals

¹http://www.ted.com/talks/jeff_han_demos_his_breakthrough_touchscreen

ein komplettes Produkt für Multitouch optimiert und auf zusätzliche Eingabemöglichkeiten vollständig verzichtet. Alle Funktionalitäten und Aufgaben wurden so gestaltet, dass sie allein mit den Fingern bedien- und lösbar sind (Apple, 2007). Dies galt sowohl für die Eingabe als auch für die Ausgabe auf dem Display. Für die Eingabe wurde darauf geachtet, dass alle dargestellten Objekte eine Mindestgröße nicht unterschreiten, um sie mit dem Finger überhaupt zuverlässig auswählen zu können. So wird beispielsweise eine ausgewählte Taste auf der *Software-Tastatur (Softkeyboard)* bei der Ausgabe auf dem Display vergrößert, damit der Benutzer ein direkt sichtbares Feedback zu seiner Interaktion erhält. Somit gelang es Apple, zwei grundlegende Probleme zu lösen: Erstens das sogenannte „*Fat Finger*“-Problem, bei dem die exakte Selektion von kleinen Elementen aufgrund der anatomischen Größe des Fingers nur schwer oder gar nicht möglich ist (Wigdor und Wixon, 2011; Zhai und Kristensson, 2012). Zweitens das Problem der *Verdeckung (Occlusion)*, bei dem Objekte auf dem Display durch die aktuelle Position des Fingers verdeckt werden (Benko et al., 2006). Abbildung 1.3 zeigt, wie iOS – Apples Betriebssystem für Touch-Geräte – diesen Problemen begegnet. Durch die Vergrößerung der ausgewählten Taste erhält der Benutzer direktes Feedback, ob die richtige Taste ausgewählt wurde. Zusätzlich kann er durch Verschieben des Fingers bei falscher Auswahl den richtigen Buchstaben auswählen, ohne vorher eine Falscheingabe machen zu müssen. Erst solch konsequente Lösungen für die entscheidenden Probleme bei Multitouch-Displays ermöglichten, Multitouch langfristig im mobilen Bereich wie Smartphones und Tablets zu etablieren.



Abbildung 1.3: *Occlusion* und *Fat-Finger* bei Multitouch-Eingaben. Durch die direkte Eingabe auf dem Bildschirm werden mehrere Tasten aufgrund der kleinen Größe durch den Finger verdeckt (*Occlusion*), sodass der Benutzer nicht weiß, ob er die richtige Taste *erwischt* hat (*Fat-Finger*).

Ist mit dem Erfolg der heutigen Smartphones und Tablets, die ausschließlich über ein Multitouch-Display bedient werden, Bill Gates' Prophezeiung aus dem Zitat also eingetroffen? Betrachtet man die anfangs erwähnte Verbreitung von Multitouch, so liegt dieser Schluss nahe. Denn bei Smartphones und Tablets werden Multitouch-Displays heute vielsei-

tig eingesetzt: zur Bildbearbeitung, zum Sortieren von Musik oder Organisieren alltäglicher Aufgaben, wie einkaufen, Emails oder Terminverwaltung. Aber auch im Bereich von Computerspielen hat sich die Multitouch-Bedienung auf Smartphones oder Tablets etabliert. Schaut man sich aber die Nutzungskontexte von Multitouch genauer an, so erkennt man, dass sich Multitouch-Displays überwiegend in den Bereichen etablieren konnten, in denen Maus und Tastatur schwierig oder nachteilig gewesen wären. Beispielsweise werden im mobilen Bereich die Geräte überwiegend beim Gehen, im Sitzen oder sogar im Liegen benutzt. Ebenso ist der Einsatz von Multitouch-Tischen im *Multi-Party-Kontext* (*Mehr-Personen-Kontext*) sinnvoller, da mit Multitouch mehrere Personen unabhängig voneinander arbeiten können.

Dies bedeutet: Fast zehn Jahre nach der erfolgreichen kommerziellen Einführung ist, es immer noch nicht gelungen, das Multitouch-Display als Standard-Eingabegerät am Computerarbeitsplatz zu etablieren. Denn trotz der allgemein hohen Verbreitung und Akzeptanz von Touch-Eingaben wird am Computerarbeitsplatz immer noch überwiegend bis ausschließlich mit Maus und Tastatur gearbeitet, selbst wenn diese in einigen Arbeitsgebieten deutliche Nachteile aufzeigen. Beispielsweise ist mit der Maus ein gleichzeitiges Rotieren und Verschieben eines Objektes im 3D-Raum, im Vergleich zum Multitouch-Display, nur mit erhöhtem Aufwand möglich, da sie nur eine geringe Anzahl von gleichzeitig veränderbaren Freiheitsgraden hat. Die Freiheitsgrade geben an, wie viele Parameter des Objektes gleichzeitig und unabhängig voneinander verändert werden können. So hat eine Standardmaus mit einem Scrollrad drei Freiheitsgrade. Durch die Sensoren können Bewegungen in der x-y-Ebene (2 Freiheitsgrade) durchgeführt werden. Das Scrollrad erlaubt die Veränderung eines weiteren Freiheitsgrades. Aus diesem Grund kann Bill Gates' Vision noch nicht als gänzlich erfüllt betrachtet werden.

Das die Absicht und der Wille zum Einsatz von Touch-Displays in der alltäglichen Computenumgebung vorhanden ist, zeigt das Bemühen von Forschung und Industrie. Matejka et al. (2009) schlagen beispielsweise die Emulation einer realen Maus mit Gesten auf Multitouch-Displays vor, um die reale Maus zu ersetzen und den Arbeitsflow mit Multitouch-Displays zu verbessern. Microsoft leitete diesen Schritt mit den Entwicklungen seiner modernen Windows-Versionen ein. Mit Windows 8 stellte Microsoft erstmals ein Betriebssystem vor, das neben der Nutzung mit Maus und Tastatur auch auf Touch-Eingaben setzt. Die Umsetzung war für die Nutzer jedoch nicht intuitiv und wurde stark kritisiert, sodass Windows 8 überwiegend auf Ablehnung stieß². Mit Windows 10 trennt Microsoft wieder die Bedienung, indem das System erkennt, ob Maus und Tastatur oder nur ein Touch-Display vorhanden ist. Je nach erkanntem Eingabegerät wird die Darstellung ausgewählt, die für das jeweilige Gerät optimiert ist. Wird beispielsweise die Tastatur entfernt, so stellt Windows 10 auf die Touch-Benutzeroberfläche um³.

Apple hingegen lehnt den Einsatz von Multitouch-Displays im Desktop-Bereich mit der Begründung der fehlenden Benutzerfreundlichkeit bei vertikalen Displays⁴ ab. Beispielsweise führt das Arbeiten an vertikalen Multitouch-Displays zur schnellen Ermüdung des

²http://www.nytimes.com/2012/10/22/technology/windows-staple-of-most-pcs-gets-a-major-makeover.html?_r=0 (letzter Zugriff 17.9.2015)

³<http://www.heise.de/newsticker/meldung/Windows-10-Microsoft-zeigt-Continuum-2409611.html> (letzter Zugriff 17.9.2015)

⁴<http://www.cnet.com/news/touch-screen-mac-unlikely-says-apples-federighi/> (letzter Zugriff: 17.9.2015)

Arms, dem sogenannten „Gorilla-Arm-Syndrom“ (Bachynskyi et al., 2015; Hincapié-Ramos et al., 2014; Loi, 2013).

Anhand dieser beiden unterschiedlichen Einstellungen zur Integration von Multitouch in den Computerarbeitsplatz ist zu erkennen, dass eine einheitliche Herangehensweise noch nicht gegeben ist. Diese Arbeit soll daher neue Impulse geben, in welche Richtung Untersuchungen und Entwicklungen noch gehen könnten, um ein besseres Verständnis für die Interaktionen mit Multitouch zu bekommen. Dadurch kann die Akzeptanz und die Einsatzfelder von Multitouch als Eingabegerät erhöht werden.

1.2. Motivation

1.2.1. Persönliche Motivation

Innerhalb meiner Masterarbeit zum Thema „Werkzeuge zur IK-basierten Gestenannotation mit Hilfe eines 3D-Skeletts“ wurden Kontrollen zur Steuerung einer 3D-Puppe entworfen, um Posen echter Menschen nachzustellen (Nguyen, 2009; Nguyen und Kipp, 2009). Die gespeicherten Posen der 3D-Puppe können dann zur Animation von virtuellen Charakteren verwendet werden. Abbildung 1.4 illustriert Beispielannotationen. Die Posen des menschlichen Sprechers (oben) werden dabei mithilfe einer 3D-Puppe nachgestellt (unten), indem Arme und Körperausrichtungen der Puppe verändert werden. Dies erforderte die Veränderung mehrere Freiheitsgrade der 3D-Puppe. Als Eingabegerät fungierten Maus und Tastatur. Aufgrund der eingeschränkten Freiheitsgrade war ein häufiges Wechseln zwischen den Funktionen mithilfe der Tastatur notwendig, was die Bedienung umständlich und nicht intuitiv machte. Trotz der umständlichen Bedienung zeigte die Evaluation des Interface, dass die Benutzer die Kontrollen zufriedenstellend bedienen konnten. Dennoch wünschten sie sich eine intuitivere und einfachere Möglichkeit, solche Aufgaben zu lösen.



Abbildung 1.4.: Skelett-basierte Gestenannotation. Die oberste Reihe zeigt die Posen des menschlichen Sprechers. Die unterste Reihe zeigt die annotierten Posen mithilfe einer 3D-Puppe.

Aus diesen Anregungen heraus entstand der Gedanke, diese komplexe Aufgabe mithilfe eines Multitouch-Display zu lösen (Kapitel 4). Dabei sollte der Vorteil des Multitouch, mehrere Freiheitsgrade gleichzeitig kontrollieren zu können, ausgenutzt werden, um eine solch komplexe Aufgabe effizienter zu lösen. Während der Entwicklung des Interface stellte sich heraus, dass es kaum konkrete Guidelines oder Empfehlungen gab, wie Interfaces für solch komplexe Aufgaben mit Multitouch gestaltet oder worauf grundlegend geachtet werden sollte. Zahlreiche Arbeiten der Vergangenheit verglichen unterschiedliche Eingabegeräte, verschiedene Interaktionstechniken für bestimmte Aufgaben, wie Selektion, Translation oder auch Rotation von Objekten, mit Multitouch. Dennoch bleiben viele grundlegende Fragen noch unbeantwortet, wie z. B.:

- Welche Interaktionstechniken sind mit einem Multitouch-Display am schnellsten?
- Ist Translation auf dem Multitouch schneller als Rotationen?
- In welchen Bereichen des Multitouch-Displays ist man am schnellsten? Sind Interaktionen auf der linken Hälfte schneller als auf der rechten Hälfte?
- Können Designvorschläge für eine Benutzeroberfläche automatisch bewertet werden, um das performanteste Design zu entwickeln?

Solch grundlegende Fragen sind allerdings essentiell, um Interfaces nach Foley et al. (1984) sowie Hinckley und Widgor (2012) optimal in Bezug auf Effizienz und Akzeptanz für Multitouch zu gestalten. Diese Überlegungen führten mich zu den Forschungsfragen dieser Dissertation (siehe Abschnitt 1.4).

1.2.2. Konkrete Anwendung

Ebenso wurden die Forschungsfragen dieser Dissertation von einer weiteren essentiellen Frage beeinflusst: Inwiefern könnte bei der Suche nach dem optimalen Design von Multitouch-Displays das Interface-Design teilweise automatisiert werden. Automatisierung setzt im Allgemeinen Modelle voraus, die Interface-Designs nach Effizienz und Interaktionstechniken nach Performanz bewerten können. Solche Modelle können nach Shneiderman und Plaisant (2004, Kapitel 2, S. 85) von Interaktions- und Benutzeroberflächen-Designern genutzt werden, um Designentscheidungen im Vorfeld zu bewerten und zu selektieren, was ihre Arbeit effizienter macht.

Das derzeitige Standardmodell zur Vorhersage der Effizienz von Interface-Designs und zur Berechnung der Performanz von Interaktionstechniken ist Fitts' Gesetz (Fitts, 1954). Dieses Gesetz erlaubt die Berechnung der Zeit, die benötigt wird um eine Aufgabe, wie das Auswählen von Objekten, anhand der Distanz vom Startpunkt zum Zielobjekt und der Zielgröße. Aktuelle Arbeiten deuten daraufhin, dass die ursprüngliche Version von Fitts' Gesetz jedoch nicht ausreichend ist, um valide Vorhersagen für Multitouch-Interaktionen zu machen (Bi et al., 2011; Weiss et al., 2010). Aus diesem Grund müssen systematische Untersuchungen durchgeführt werden, um festzustellen, ob Fitts' Gesetz für Multitouch-Interaktionen ausreicht oder erweitert werden muss (Kapitel 5, 6 und 7).

Diese Erkenntnisse sollen neue Impulse liefern, um Modelle wie Fitts' Gesetz anzupassen, damit Interaktionstechniken präziser und realistischer bewertet werden können. Dadurch wären auch Software-Lösungen möglich, die Interface-Designs automatisch analysieren und bewerten können.

1.3. Herausforderungen

Foley et al. (1984) bewertet die Qualität eines User Interfaces anhand von drei Kriterien:

- *Time*: Wie lange braucht der Nutzer, um mit dem System seine Aufgaben zu erledigen?
- *Accuracy*: Mit welcher Genauigkeit kann der Nutzer mit dem System seine Aufgaben erledigen?
- *Pleasure*: Welche *Freude* empfindet er bei der Nutzung des Systems?

Diese Anforderungen finden sich ähnlich auch im ISO-Standard „DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion Teil 11 Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit“ (Deutsches Institut für Normung, 2006). Dort heißen sie *Effektivität*, *Effizienz* und *Zufriedenheit*. Um das Arbeiten an Multitouch-Display effizienter und ergonomischer zu gestalten, müssen die Stärken und Vorteile des Multitouch-Display sinnvoll und gezielt eingesetzt werden. Legt man die genannten Kriterien und Anforderungen zugrunde, so ergeben sich folgende direkte Herausforderungen für *Effektivität*, *Effizienz* und *Zufriedenheit*.

Effektivität

Effektivität ist die „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel (Arbeitsergebnis) erreichen“. Das heißt, die vorliegenden Aufgaben sind mit einem System möglichst vollständig und korrekt zu erfüllen (Deutsches Institut für Normung, 2006).

Bei der Interaktion per Multitouch muss der Benutzer alle anstehenden Aufgaben erledigen können. Dabei muss er jederzeit das Gefühl der Kontrolle und einer koordinierten Bedienung des Interface haben. Wenn das Interface die Möglichkeit bietet viele Freiheitsgrade gleichzeitig manipulieren zu können, der Benutzer diese aber nicht steuern kann und sich dadurch inkompetent fühlt, wird es sich nicht durchsetzen. Jedoch ist genau die theoretisch unbegrenzte Anzahl der veränderbaren Freiheitsgrade eine der größten Stärken des Multitouch-Display. Daher muss sichergestellt werden, dass der Anwender überhaupt in der Lage ist, solche Steuerungen koordiniert und gezielt einzusetzen, um damit zu arbeiten.

Effizienz

Effizienz ist der „im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel (Arbeitsergebnis) erreichen“. Das heißt, der Benutzer muss mit der vorhandenen Systemfunktionalität in der Lage sein, die anstehenden Aufgaben zuverlässig und mit möglichst wenig Aufwand zu lösen. Die Effizienz steht im Verhältnis

zur Effektivität. Gemessen werden kann dies anhand der Zeit, die ein Benutzer braucht, um eine Aufgabe zu erfüllen (Deutsches Institut für Normung, 2006).

Bei der Interaktion mit dem Multitouch darf der Benutzer nicht das Gefühl haben, dass er permanent langsamer ist als mit dem gewohnten Eingabegerät. Er muss zumindest die Chance sehen, in kurzer Zeit mindestens genauso schnell zu werden, wie mit seinem vertrautem Eingabegerät. Im Idealfall wird er auch ohne Trainingsphase schneller sein Ziel erreichen als zuvor. Ist dies auch nach einer Trainingsphase nicht gegeben, wird der Anwender das neue Interface ablehnen und die Arbeit mit dem bewährten Gerät durchführen. Denn um ein neues Eingabegerät bzw. Interface etablieren zu können, spielen die bestehenden Gewohnheiten der Benutzer eine entscheidende Rolle. Denn sobald die Benutzer sich mit einem neuen System auseinandersetzen müssen, verlieren sie zunächst ihre bestehende Kompetenz. Je kompetenter ein Benutzer im Umgang mit einem System war, desto größer die Gefahr, vom Experten zum Anfänger zu werden. Die *Kosten*, die beim Umstieg von einem bekannten auf ein neues System entstehen, bezeichnen Wigdor und Wixon (2011) als „Gulf of Competence“. Abbildung 1.5 illustriert diese am Beispiel des Erlernens von Tastenkombinationen. Der Benutzer lernt zuerst die Maus zu bedienen (erste Phase), ersetzt dies dann jedoch durch Hot-Keys (zweite Phase). Dadurch fällt die bestehende Kompetenz zunächst, bevor ein erneuter – ggf. sogar stärkerer – Anstieg verzeichnet werden kann. Es gilt: Je niedriger die *Kosten* beim Erlernen eines neuen Systems sind, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass es verwendet wird.

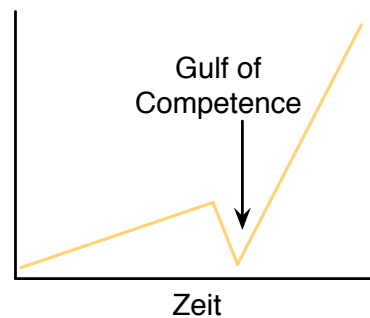


Abbildung 1.5: Gulf of Competence. Das Beispiel illustriert die Lernkurve beim Wechsel von Maus auf Tastenkombinationen (*Hot-Keys*) zur Steuerung von Computersystemen. (Abbildung angelehnt an Wigdor und Wixon, 2011, S.148).

Um Multitouch-Displays zu etablieren, muss ebenfalls die „Gulf of Competence“ überwunden werden: Der Einsatz von Maus und Tastatur ist seit Jahrzehnten ein fester Bestandteil unserer alltäglichen Arbeit am Computer und Computernutzer sind darauf ausgelegte Benutzeroberflächen gewohnt. Um dagegen bestehen zu können, müssen Multitouch-Interfaces und Interaktionstechniken so gestaltet sein, dass die gewohnten Aufgaben nicht nur effektiv, sondern auch effizient bewältigt werden können. Das schafft die Grundlage für die Zufriedenheit und somit auch für die Akzeptanz der Benutzer.

Ein wichtiges Werkzeug bei der Untersuchung von Effizienz ist Fitts' Gesetz ein Modell zur Vorhersage von Ausführungszeiten für Interaktionstechniken (siehe Abschnitt 2.2). Zusätzlich ermöglicht es den Vergleich von Interaktionstechniken und Eingabegeräten. Die

Ergebnisse können anschließend zur Optimierung eingesetzt werden, um die Effizienz zu steigern und die „Gulf of Competence“ zu reduzieren.

Zufriedenheit

Zufriedenheit ist definiert als „Beeinträchtigungsfreiheit der Nutzung und positive Einstellungen der Benutzer zur Produktnutzung“. Dieses Kriterium beschreibt die Zufriedenheit der Benutzer bei der Nutzung eines interaktiven Systems. Es handelt sich hierbei um ein eher subjektives Kriterium, welches dennoch näher gemessen werden kann. Tullis und Albert (2008) empfehlen zudem Metriken, um solche Werte quantitativ abzubilden. Diese Informationen können beispielsweise systematisch mithilfe von Nutzerbefragungen, Fokusgruppen oder Fragebögen erfasst werden. Auch lässt sich Zufriedenheit am Verhältnis von positiven zu negativen Kommentaren während der Programmbenutzung, der Häufigkeit des Produktverkaufs oder an der Häufigkeit von Beschwerden messen (Deutsches Institut für Normung, 2006).

Die Arbeit mit dem neuen Eingabegeräte darf den Benutzer nicht frustrieren oder ihm Nachteile verschaffen, die zu einer Unzufriedenheit führen. Neben den Kriterien Effektivität und Effizienz spielen beispielsweise auch Ergonomie und Ermüdung eine große Rolle. Ist ein Eingabegerät beispielsweise unbequem in der Bedienung oder verspürt der Benutzer Ermüdung schneller oder stärker als zuvor, so wird er das neue Eingabegerät ablehnen. Ein weiterer Faktor kann die intuitive Bedienung des Geräts sein. Versteht der Benutzer das Interface leicht oder vergisst er die Bedienung wieder schnell, sodass er sich jedes Mal neu einarbeiten muss?

Fazit

Jede Interaktionstechnik muss diese Herausforderungen lösen, um sich erfolgreich zu etablieren. Aus diesem Grund befasst sich diese Arbeit mit der Beantwortung dieser Herausforderungen speziell für das Multitouch. Darauf aufbauend werden die Forschungsfragen dieser Dissertation formuliert.

1.4. Forschungsfragen

Der Fokus dieser Arbeit ist eingebettet im theoretischen Zweig der *Mensch-Computer-Interaktions-Forschung (Human-Computer-Interaction, HCI)*, der grundlegende Erkenntnisse zur Interaktion zwischen Mensch und Computer liefert. Daher ist das Ziel dieser Arbeit, einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis der Basisinteraktionen wie Translation oder Rotation mit Multitouch-Displays zu leisten. Als Grundlage werden die Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation untersucht, um neue Erkenntnisse zu liefern. Diese sollen helfen Interaktionstechniken auf Multitouch-Displays effizienter und intuitiver einzusetzen oder diese hinsichtlich dieser Aspekte zu optimieren. Diese Erkenntnisse liefern die Basis für Guidelines und Empfehlungen zum Design von Interfaces und Interaktionstechniken, die dann vom praktischen Zweig der HCI-Forschung als Ausgangspunkt und

Grundlage eingesetzt werden können, um intuitivere und effizientere Interaktionstechniken zu entwickeln.

Die übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit lautet daher:

Wie können intuitive und effiziente Interaktionstechniken entwickelt werden?

Zur Beantwortung dieser Frage ist es notwendig, die oben erläuterten Kriterien der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit zu erfüllen. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Klärung von grundlegenden Fragen liegt, wird die umfassende Forschungsfrage in Teilprobleme aufgeteilt. Diese überprüfen zunächst, ob die drei Anforderungen ausnahmslos erfüllt werden und identifiziert eventuelle Defizite, die in zukünftigen Arbeiten beseitigt oder näher untersucht werden müssen. Hieraus ergeben sich folgende Fragen:

Effektivität

- (F1) **Sind unerfahrene Multitouch-Nutzer überhaupt in der Lage, gleichzeitig mehrere Freiheitsgrade mit den Fingern zu kontrollieren?** Der Vorteil des Multitouch-Display ist die Kontrolle und gleichzeitige Veränderung mehrerer Freiheitsgrade. Wenn normale Computernutzer ohne großen Trainingsaufwand diese Kontrollen koordiniert steuern könnten, könnten komplexe Aufgaben mit dem Multitouch-Display gelöst werden, die mit Maus und Tastatur nur mit erhöhtem Aufwand oder gar nicht möglich wären.
- (F2) **Erfolgt die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch koordiniert?** Bei der gleichzeitigen Veränderung von mehreren Freiheitsgraden spielt neben der Parallelität auch die Koordination eine wichtige Rolle. Parallelität bedeutet die gleichzeitige Veränderung mehrerer Freiheitsgrade, statt einer sequentiellen Abarbeitung. Diese Bewegungen sollten nicht nur parallel sondern auch möglichst koordiniert stattfinden, d. h. der Benutzer muss jederzeit das Gefühl haben, die Kontrollen über das Interface zu beherrschen.

Effizienz

- (F3) **Verschlechtert sich die Effizienz durch die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch im Vergleich zu Maus und Tastatur?** Damit ein Multitouch-Display als Alternative für Maus und Tastatur in Betracht kommt, ist es notwendig, dass sich die Stärken und Vorteile des Multitouch auch in dessen Effizienz widerspiegeln. D. h. die Multitouch-Interaktion sollte im Idealfall schneller als die Interaktion mit Maus und Tastatur, darf jedoch keinesfalls langsamer als diese Standardeingabegeräte sein. Ist dies nicht der Fall so darf er zumindest langfristig nicht schlechter sein, d. h. er muss die Chance sehen in kurzer Zeit mindestens genauso gut zu sein wie mit seinem bekannten Eingabegerät.
- (F4) **Ist die Originalformulierung von Fitts' Gesetz ausreichend, um Interaktionszeiten für Multitouch adäquat vorherzusagen?** Derzeitige Arbeiten verwenden nur die ori-

ginale Version von Fitts' Gesetz zur Analyse und Vergleich der Performanz von Interaktionstechniken. Ist die Originalformulierung von Fitts' Gesetz jedoch ausreichend, um die Performanz von Translationsaufgaben insbesondere für Multitouch-Geräte genau abzubilden? Ein genaues Modell erhöht nicht nur die Qualität der Analysen, sondern kann auch zur teilautomatisierten Analyse von Interaktionstechniken und Interfaces eingesetzt werden.

- (F5) **Spielt die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation bei Multitouch eine Rolle für die Effizienz?** Rotation und Translation werden häufig gemeinsam genutzt. Daher soll ermittelt werden, ob die Bewegungsrichtungen der Teilbewegungen für die Effizienz der Gesamtbewegung eine Rolle spielt. Mit der Beantwortung dieser Frage kann diese Interaktionstechnik effizienter eingesetzt werden.
- (F6) **Haben auf Multitouch die Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation die gleiche Performanz?** Interaktionstechniken sollen nicht nur intuitiv und leicht erlernbar, sondern auch so performant wie möglich sein. Sollten die häufig verwendeten Standardtechniken für Translation und Rotation nicht gleich performant sein, wäre eine eventuelle Suche nach neuen Alternativen oder deren Optimierung sinnvoll.

Zufriedenheit

- (F7) **Kann die schnelle Ermüdung bei der Nutzung von Multitouch verhindert werden?** Die Arbeit an Multitouch-Displays wird oft als schnell ermüdend empfunden (Bachynskyi et al., 2015; Loi, 2013). Gibt es Möglichkeiten dem entgegenzuwirken?
- (F8) **Wirkt sich die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation auch auf die Schwierigkeit der Interaktionstechnik aus?** Bei der gemeinsamen Ausführung von Rotation und Translation soll ermittelt werden, ob die Bewegungsrichtungen der Teilbewegungen einen Einfluss auf die Ausführung der Gesamtbewegung hat. Mit der Beantwortung dieser Frage könnten Interfaces intuitiver gestaltet werden.

1.5. Aufbau dieser Arbeit

Kapitel 2 führt die grundlegenden Begriffe und Konzepte von Interaktionstechniken mit Multitouch-Displays ein. Ebenso werden die theoretischen Grundlagen für die Analysen dieser Arbeit erläutert und definiert.

Kapitel 4 stellt ein komplexes Multitouch-Interface vor, mit dem die Positionierung eines virtuellen Arms interaktiv möglich ist. Innerhalb dieses Kapitels soll untersucht werden, ob unerfahrene Multitouch-Nutzer in der Lage sind, hochkomplexe Aufgaben wie die gleichzeitige Steuerung mehrerer Freiheitsgraden mit einem Multitouch-Display zufriedenstellend und koordiniert zu lösen. Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden

auf der internationalen *ACM Konferenz Interactive Tabletops and Surfaces 2010 (ITS10)* publiziert (Kipp und Nguyen, 2010).

Kapitel 5 stellt eine Studie vor, bei der die grundlegende Frage geklärt werden soll, ob die Schwierigkeit der Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation gleich ist.

Kapitel 6 untersucht innerhalb einer Studie wie intuitiv und effizient die kombinierte Standardinteraktionstechnik für Rotation und Translation ist. Teile dieses Kapitels wurden auf der *ACM Konferenz Conference on Human Factors in Computing Systems 2014 (CHI '14)* publiziert (Nguyen und Kipp, 2014).

Kapitel 7 untersucht innerhalb einer Studie die Auswirkung der Variation verschiedener Parameter, wie unterschiedliche Startposition oder Bewegungsrichtung, auf die Performanz der Standardinteraktionstechnik für Translation. Diese Studie soll grundlegende Erkenntnisse zur Benutzung der Standardinteraktionstechnik für Translationsaufgaben liefern und zusätzlich untersuchen, ob aktuelle Methoden zum Vergleich von verschiedenen Interaktionstechniken ausreichend sind oder erweitert werden müssen. Der Inhalt dieses Kapitels wurde auf der internationalen Konferenz *Human-Computer Interaction 2015 (INTERACT 2015)* publiziert und mit dem *Best Paper Award* ausgezeichnet (Nguyen und Kipp, 2015).

Kapitel 8 diskutiert abschließend die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit innerhalb einer Diskussion und skizziert mögliche zukünftige Arbeiten. Zusätzlich liefert sie Vorschläge für Guidelines, die sich direkt aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben.

KAPITEL 2

Grundlagen

„Der Beginn der Weisheit ist die Definition der Begriffe.“

Sokrates, 470–399 v. Chr., griechischer Philosoph

Dieses Kapitel führt die notwendigen Begriffe und Konzepte ein und liefert zusätzlich das theoretische Grundgerüst auf dem diese Arbeit aufbaut. Dazu gehört die Begriffsdefinition von Interaktionstechnik und die Abgrenzung zu den notwendigen Konzepten, die in den Hauptkapiteln verwendet werden. Diese Konzepte beschreiben die möglichen Eigenschaften der Interaktionstechniken sowie deren Stärken und Umsetzungsmöglichkeiten, um die gestellten Aufgaben zu erfüllen. Ebenso gibt dieses Kapitel einen Überblick über die wichtigsten Vorhersagemodelle, die in der Mensch-Computer-Interaktions-Forschung (Human-Computer-Interaction, HCI) verwendet werden. Insbesondere wird Fitts' Gesetz vorgestellt, das die Grundlage der quantitativen Analysen dieser Arbeit darstellt.

2.1. Interaktionstechnik

2.1.1. Begriffserklärungen

Interaktionstechnik

Hinckley und Widgor definieren *Interaktionstechnik* als Fusion von Ein- und Ausgabegeräten sowie allen Hard- und Software-Elementen, die benötigt werden, damit der Benutzer seine anstehenden Aufgaben erfüllen kann (Hinckley und Widgor, 2012). Dabei nehmen Eingabegeräte die Eingaben des Benutzers auf, während Ausgabegeräte dazu dienen, dem Benutzer Feedback über den Zustand des Computersystems zu geben. Zu diesem Zweck verarbeiten verschiedene Softwareelemente zum einen die Benutzereingaben, um sie in computerverständliche Befehle umzuwandeln und zum anderen generieren sie gleichzeitig die Ausgabe als Feedback für den Benutzer.

Beispielsweise ist das Bewegen der Maus bei gedrückter Maustaste die Standardinteraktionstechnik bei heutigen grafischen Benutzeroberflächen mit Maus und Tastatur geworden, um Objekte zu verschieben. Der Mauszeiger selbst ist dabei nur ein Element der Interaktionstechnik, genau wie die Maus oder das Display zur Darstellung der grafischen Ausgabe. Die Gestaltung von Interaktionstechniken und deren Elementen sind von den jeweiligen Eingabegeräten abhängig, da diese unterschiedliche Stärken und Möglichkeiten haben, die ausgenutzt werden sollten. Ebenso muss bei der Auswahl und Implementierung von Interaktionstechniken die unterschiedliche Expertise der Benutzerklassen wie Experten und Anfänger sowie deren konkrete Bedürfnisse berücksichtigt werden.

Eingabegeräte

Eingabegeräte sind nach Hinckley und Widgor Umwandler, die physische Eigenschaften wie Bewegung, Orientierung oder Größe von Personen, Objekten oder Dingen erkennen und verarbeiten können. So ist beispielsweise die Maus eine Ansammlung von Umwandlern wie relativen x-y-Bewegungssensoren, physikalischen Knöpfen und Rädern zum Scrollen (Card et al., 1991, 1990).

Konzeptuelle Modelle

Damit der Benutzer die anstehenden Aufgaben mit den unterschiedlichen Eingabegeräten und den dazugehörigen Interaktionstechniken erledigen kann, müssen die darunterliegenden *konzeptuellen Modelle* (*Conceptual Model*) dem Benutzer bekannt sein. Ein konzeptuelles Modell ist nach Hinckley und Widgor ein kohärentes Modell, das den Benutzer über die Funktion des Systems informiert, d. h. was es ist, wie es arbeitet und wie es auf die Eingaben des Benutzers reagiert. Dadurch sollte der Benutzer in der Lage sein rückzuschließen, welche Eingaben das System benötigt, damit sein beabsichtigtes Ziel erreicht wird. Diese Modelle können anfangs erlernt sein, sollten aber durch die ständige Interaktion mit dem System erweitert werden. Beispielsweise ist die *Point-and-Click*-Metapher ein grundlegendes konzeptuelles Modell in modernen grafischen Benutzeroberflächen, bei dem der Pointer, das grafische Symbol für das Steuerungsgerät (z. B. Maus), auf grafische Objekte bewegt und durch Klicken der Maustaste ausgewählt wird. Die ausgewählten Objekte können dann mit gedrückter Maustaste bewegt werden und in sogenannte *Container* abgelegt werden. Dieses Ablegen von Objekten ist ein weiteres konzeptuelles Modell. Es beschreibt die Speicherung und Organisation von Informationen und Daten. Hat der Benutzer diese Modelle verinnerlicht, so kann er sie problemlos übertragen – zum Beispiel wenn das Eingabegerät von Maus auf Trackball gewechselt wurde.

Benutzerschnittstelle

Eine *Benutzerschnittstelle* (*User Interface, UI*) repräsentiert das gesamte System, mit dem der Benutzer interagieren kann. Es umfasst alle möglichen Ein- und Ausgabegeräte, konzeptuelle Modelle und Interaktionstechniken. Dabei können nicht nur visuelle, sondern auch auditive, taktile oder kinästhetische Kanäle angesprochen werden. Die Aufgabe des User Interface ist es, dem Benutzer die zugrundeliegenden konzeptuellen Modelle zu ver-

mitteln und dessen bereits erlernte Konzepte zu festigen. Dies soll in Zusammenspiel mit den Eingabegeräten und Interaktionstechniken geschehen (Hinckley und Widgor, 2012). Elemente mit sogenanntem *Aufforderungscharakter* (*Affordances*) können dabei eingesetzt werden, sodass dem Benutzer auf Anhieb klar ist, wie die Elemente verwendet werden oder wie Schlüsselaufgaben zu erledigen sind. Beispielsweise erkennen Computernutzer Buttons wieder, weil sie diese schon aus anderen Interfaces oder der realen Welt her kennen und wissen, dass durch das Drücken auf Buttons Aktionen ausgelöst werden (Hughes et al., 2013).

2.1.2. Konzepte

Für eine optimale Gestaltung von Interaktionstechniken müssen bei der Fusion der einzelnen Komponenten die unterschiedlichen Eigenschaften der Ein- und Ausgabegeräte sowie das Softwareverhalten berücksichtigt werden. Dies dient zum einen dazu, die Stärken und Möglichkeiten der fusionierten Komponenten zu nutzen. Zum anderen können die Anforderungen und Spezifikationen der Aufgabe und des Kontextes dadurch erfüllt werden. Diese Eigenschaften haben u. a. Buxton (2014) sowie Hinckley und Widgor (2012) als Unterschiede bzw. Eigenschaften von Eingabegeräten oder Interaktionstechniken beschrieben.

Die relevantesten Unterschiede bzw. Eigenschaften sollen im Folgenden als Konzepte zusammengefasst werden. Zusätzlich werden exemplarisch Arbeiten vorgestellt, die diese Konzepte umsetzen.

Diskret vs. kontinuierlich

Die Ein- und Ausgabedaten der Interaktionstechniken können *diskret* (*discrete*) oder *kontinuierlich* (*continuous*) sein. Beispielsweise ist eine diskrete Interaktion das Drücken eines Buttons; eine kontinuierliche Aktion ist das Verschieben eines Objektes. Dabei können manche Aufgaben sowohl diskret als auch kontinuierlich ausgeführt werden. Zum Beispiel konnten Luo und Vogel (2014) zeigen, dass die Selektion von Objekten mit einer kontinuierlichen Interaktionstechnik, bei der das Objekt gekreuzt wird, schneller ist als die bekannte diskrete Variante mit dem Klicken auf das Objekt. Auch die Eingabe von Text über eine Multitouch-Tastatur kann kontinuierlich erfolgen, indem die Buchstaben nicht nacheinander angetippt, sondern über eine Geste ausgesucht werden (Arif et al., 2014; Isokoski et al., 2010; Rick, 2010). Auch Befehle können über diese Art und Weise eingegeben werden, indem sie auf verschiedene Gesten abgebildet werden (Kristensson und Zhai, 2007).

Absolut vs. relativ

Bei *absoluten* Interaktionstechniken spielt der aktuelle Wert des Eingabegerätes eine Rolle. In der Regel wird dabei der aktuelle Wert 1:1 übertragen. Der Benutzer erhält dadurch ein unverfälschtes Feedback seiner Interaktion, da die realen Bewegungen im selben Maßstab auf das Objekt übertragen werden. Bei *relativen* Techniken ist die Veränderung seit der letzten Interaktion relevant, da nur diese auf das zu verändernde Objekt (z. B. Mauszeiger) angewendet werden. Somit können die zu steuernden Objekte über weitere Distanzen

bewegt werden, als es bei der absoluten Eingabe möglich wäre. Eine typisch absolute Interaktionstechnik ist die Selektion mit Stylus-Stiften oder Trackballs. Die relative Variante ist die Verwendung einer Maus oder eines Touchpads.

Nachteil bei absoluten Interaktionstechniken ist, dass es zu Verschiebungen kommen kann, wenn ein Eingabegerät mehrere Variablen steuert und sein Wert dadurch nicht mehr mit den Werten der Variablen übereinstimmt. Ebenso können Bereiche nicht erreicht werden, weil die Arbeitsfläche zu klein oder auch die Reichweite des Benutzers zu gering ist wie beispielsweise durch einen zu kurzen Arm. Dieses Problem kann durch eine relative Interaktionstechnik umgangen werden. Jedoch hat der relative Ansatz das Problem, dass ein Nachgreifen notwendig werden kann. Es ist aber auch möglich beide Formen zu mischen. Beispielsweise stellen Sears und Shneiderman (1991) eine Interaktionstechnik zur präziseren Selektion vor, bei dem der Cursor bei kleinen Bewegungen relativ zur Fingerposition reagiert und bei schnellen Bewegungen wieder absolut.

Control-to-Display Ratio

Control-to-Display Ratio (C:D Gain) beschreibt das Verhältnis der zurückgelegten Strecke zwischen dem Eingabegerät und der Bewegung auf dem Display. Dieser Faktor wird beispielsweise verwendet, um das Nachgreifen bei Interaktionstechniken mit der Maus zu reduzieren. Ein zu geringer Wert kann die Effizienz reduzieren, während ein zu hoher Wert kaum Effekte zeigt (Casiez et al., 2008). Ebenso zeigt sich, dass ein dynamisch angepasster Beschleunigungsfaktor effizienter ist als ein konstanter *Control-to-Display Ratio*.

Freiheitsgrade

Interaktionstechniken sind abhängig von der Anzahl der möglichen *Freiheitsgrade (Degrees of Freedom, DoF)* des Eingabegerätes. Die DoF eines Gerätes geben an, wie viele Manipulationen parallel ausgeführt werden können. So hat die Maus zwei DoF, da sie gleichzeitig die x- und die y-Achse verändern kann. Die DoF von Multitouch hingegen hängt von der Anzahl der Finger ab, die das System erkennen kann, wobei jeder Finger in der Regel zwei DoF hat.

Sequentiell vs. parallel

Bei der *sequentiellen* Arbeitsweise werden die notwendigen Handlungen nacheinander abgearbeitet, während bei der *parallelen* Arbeitsweise mehrere Schritte gleichzeitig durchgeführt werden können (Latulipe, 2006). Beispiel für sequentielle Aufgaben im Alltag ist das Klettern am Seil, bei dem die Hände in der Regel nacheinander eingesetzt werden. Eine parallele Aufgabe ist beispielsweise das Gitarrespielen, bei dem eine Hand die Akkorde greift während die andere Hand gleichzeitig die Saiten zupft.

Die Parallelität ist von den möglichen Freiheitsgraden des Eingabegerätes abhängig. Beispielsweise kann eine Standardmaus ohne Scrollrad nur zwei Freiheitsgrade (x- und y-Koordinate) manipulieren. Dadurch ist es nicht möglich, ein Objekt gleichzeitig zu verschieben und zu rotieren. Hancock et al. (2007) und Kruger et al. (2005) integrieren mit

softwaretechnischen Lösungen die Rotation in die Translation, sodass mehr Freiheitsgrade verändert werden können als das Eingabegerät steuern kann.

Direkt vs. Indirekt

Der Begriff der *Direkten Manipulation* wurde von Shneiderman geprägt (Shneiderman, 1982, 1983) und beschreibt die Interaktionsform, d. h. wie die Informationseingabe softwaretechnisch umgesetzt werden soll. Sie beinhaltet vier Hauptprinzipien: Erstens die *permanente Sichtbarkeit* der jeweils interessierenden Objekte und Aktionen. Zweitens sollen komplexe Kommandos durch *physische Aktionen* ersetzt werden. Drittens sollen *schnelle und umkehrbare Benutzerinteraktionen* möglich sein. Viertens ermöglicht unmittelbares *optisches Feedback* eine Benutzung durch unerfahrene Nutzer. Durch Umsetzung dieser Prinzipien sollen die Systeme schneller für Anfänger erlernbar werden, eine effiziente Arbeitsweise für Experten bieten und Interaktionsmöglichkeiten für Gelegenheitsbenutzer bieten, die leicht zu merken sind.

Hinckley und Widgor (2012) unterscheiden zwischen *direkten* und *indirekten* Eingabegeräten. Demnach vereinen direkte Eingabegeräte wie Multitouch-Displays die Ein- und Ausgabe in einem Gerät. Eine Maus hingegen ist ein indirektes Eingabegerät. Sie wird auf dem Tisch bewegt, das damit verbundene Objekt (Mauszeiger) bewegt sich jedoch auf einem anderen Objekt (Bildschirm).

Dieses *Anfassen* des Objekts ist ein gutes Abbild des Arbeitens in der realen Welt. Dadurch erscheint das Arbeiten an Multitouch-Displays als intuitiver (Albinsson und Zhai, 2003). Für diese Art der Interaktion wird auch der Begriff *direct touch* gebraucht (Cockburn et al., 2012; Forlines et al., 2007; Kin et al., 2009; Luo und Vogel, 2014; Withana et al., 2010). Verwendet man ein Multitouch-Display jedoch als indirektes Eingabegerät so kann sich die Performanz auch verschlechtern (Schmidt et al., 2009).

Direkte Eingabegeräte wie Multitouch-Displays weisen aber auch Nachteile auf. Durch die Interaktion mit der Hand direkt auf dem Ausgabegerät werden häufig Objekte wie Menüs und andere Kontrollen verdeckt (*Occlusion*) (Benko et al., 2006). Bei indirekten Eingabegeräten kommt dies hingegen nicht vor. Zusätzlich können damit Bedienungen über weitere Distanzen realisiert werden, die Bedienung von großen Displays ist auch mit kleinen Bewegungen möglich, während direkte Eingabegeräte große Bewegungen notwendig machen. Kleinere Bewegungen reduzieren die Ermüdung bei längeren Arbeiten.

Unimanual vs. bimanual

Nach Guiard (1987) werden die meisten Dinge im Alltag mit zwei Händen erledigt, während in der HCI die nicht-dominante Hand oft vernachlässigt wird (Hinckley und Widgor, 2012). Interaktionstechniken können jedoch sowohl als *unimanuale* (*einhändige*) als auch *bimanuale* (*zweihändige*) Interaktion entworfen werden. Beispielsweise haben Cohé et al. (2011) oder Hancock et al. (2007) die Rotation von Objekten mit einer Hand realisiert, während Hancock et al. (2009) mit *Sticky Tools* und Reisman et al. (2009) mit *Screen-Space* die Rotation mit zwei Händen durchführen. Arbeiten bestätigen, dass die richtige Wahl zwischen ein- oder

zweihändiger Bedienung entscheidend für die Effizienz der Interaktionstechnik ist (Kabbash et al., 1994; Latulipe, 2006).

Asymmetrisch vs. symmetrisch

Guiard (1987) beschäftigte sich mit der theoretischen Betrachtung von *asymmetrischen bimanualen Aktionen*, bei denen jede Hand unterschiedliche Bewegungen bzw. Teilaufgaben ausführten, um zusammen eine übergeordnete Aufgabe zu lösen. Daraus leitete er drei Prinzipien des motorischen Zusammenspiels ab. Das erste Prinzip *Right-to-Left Spatial Reference* geht davon aus, dass die nicht-dominante Hand (links) den Referenzrahmen für die dominante Hand (rechts) vorgibt. Bei *Left-Right Contrast in the Spatial-Temporal Scale of Motion* arbeitet die rechte Hand schneller und feiner als die linke Hand. Beim dritten, dem sogenannten *Left-Hand Precedence in Action* Prinzip, geht Guiard davon aus, dass die linke Hand die Aktion immer zuerst startet. Als Beispiel für eine alltägliche zweihändige Aufgabe nennt Guiard das handschriftliche Schreiben mit Stift und Papier. Beim Schreiben wird das Blatt mit der linken Hand ständig neu positioniert (Right-to-Left Spatial Reference), während die rechte Hand die Schreibe Bewegungen ausführt, die schneller und feiner sind als die Bewegungen der linken Hand (Left-Right Contrast in the Spatial-Temporal Scale of Motion). Als Beispiel für Left-Hand Precedence in Action gilt das Eindrehen von Schrauben mit einem Schraubendreher: Vor dem Eindrehen muss die linke Hand die Schraube erst in Position bringen.

Kabbash et al. (1994) zeigten zudem, dass neben der Wahl zwischen uni- und bimanualer Interaktion auch das Design der bimanualen Interaktionstechnik eine entscheidende Rolle spielt. Beim Vergleich verschiedener bimanualer mit einer unimanualen Interaktionstechnik in einer asymmetrischen Aufgabe zeigte sich, dass eine der beiden asymmetrischen bimanualen Techniken die effizienteste war. Das Design der anderen führte hingegen zu einer verschlechterten Leistung gegenüber der unimanualen Technik und gleichzeitig zu einer höheren kognitiven Belastung.

Im Gegensatz zu den asymmetrischen bimanualen Aktionen untersuchte Latulipe (2006) symmetrische Interaktionen. Bei dieser Art von Interaktionen führen beide Hände die gleiche Bewegung mit gleicher Genauigkeit aus, um eine übergeordnete Aufgabe zu lösen. Als typische symmetrische bimanuale Aufgabe im Alltag gelten das Klatschen mit zwei Händen oder das Spielen auf einem Klavier. Für ihre Untersuchung wählte sie die Vergrößerung, Translation und Rotation von Objekten. Auch sie konnte zeigen, dass die symmetrische Interaktionstechnik bei der Erledigung von symmetrischen Aufgaben sowohl die asymmetrische als auch die unimanuale Interaktionstechnik mit der Maus in Bezug auf Geschwindigkeit schlug.

Die Arbeiten von Kabbash et al. und Latulipe zeigen, dass die richtige Klassifizierung der Aufgabe wichtig ist, damit das richtige Konzept angewendet werden kann.

Hände und Finger vs. Eingabeobjekt

Neben den Händen, Fingern und Stylus-Stiften können neue Multitouch-Systeme auch beliebige Objekte, sogenannte *Tangible Objects*, erkennen und verarbeiten (Baudisch et al., 2010; Ishii und Ullmer, 1997; Klompaker et al., 2012). Dabei wird nicht nur erkannt, um welches Objekt es sich handelt, sondern auch deren Orientierung und Position. Diese Informationen könnten in Verbindung mit der Handeingabe genutzt werden, um neue Interaktionstechniken zu entwickeln. Beispielsweise können externe Tastaturen oder physische Schieberegler vom Multitouch erkannt werden, wenn diese auf die Touch-Oberfläche gelegt werden (Weiss et al., 2009). Somit kann durch den zusätzlichen Einsatz von haptischen Eingabegeräten, die Vorteile beider Eingabemodalitäten verbunden werden.

Single-Finger vs. Multi-Finger

Mit Einsatz *mehrerer Finger (Multi-Finger)* kann die Parallelität der Interaktion erhöht werden, da mehrere Freiheitsgrade gleichzeitig verändert werden können (Hancock et al., 2006; Hancock et al., 2007). Kin et al. (2009) zeigten jedoch, dass die Verwendung mehrerer Finger einer Hand zu mehr Fehlern führt und dies langsamer ist als eine zweihändige Interaktion.

Multi-Hände vs. Multi-Finger

Der Benutzer kann in einigen Fällen entweder *mehrere Hände (Multi-Hands)* oder *mehrere Finger (Multi-Finger)* für dieselbe Interaktionstechnik verwenden. Beispielsweise kann die *Pinch-To-Zoom*-Geste zur Vergrößerung von Objekten mit zwei Fingern beider Hände oder mit zwei Fingern derselben Hand ausgeführt werden. Entscheidend ist für die Berechnung nur der Abstand zwischen den Fingern. Die Interaktionstechnik kann aber auch die Verwendung von zwei Händen erzwingen, indem entweder die Hände vom System erkannt werden (Murugappan et al., 2012) oder die Nutzung der Finger so definiert wird, dass eine einhändige Interaktion nicht möglich ist (Hancock et al., 2006; Hancock et al., 2009).

2.1.3. Interaktionsaufgabe

Foley et al. (1984) beschreiben in ihrer wegweisenden Arbeit über Interaktionstechniken sogenannte *Interaktionsaufgaben (Interaction Tasks)*, die von den Benutzern innerhalb eines grafischen Interfaces ausgeführt werden können. Sie sind benutzerorientiert sowie applikations- und hardwareunabhängig und können zu komplexeren Interaktionsaufgaben zusammengesetzt werden. Foley et al. identifizieren in ihrer Arbeit sechs solcher Interaktionsaufgaben, die im folgenden vorgestellt werden. Sie sind nach Foleys Idee elementar und können nicht in kleinere Aufgaben untergliedert werden.

Hinckley und Widgor (2012) kritisieren die Sichtweise dieser elementaren Aufgaben, da diese nur schwer abzugrenzen sind und ihrer Meinung nach sehr stark von den Eingabegeräten abhängen. Beispielsweise bringen neue Techniken auch neue *elementare* Datentypen wie Ortsdaten oder Bilder mit sich. Diese neuen Datentypen erfordern neue Aufgaben und Nutzungsszenarios. Zusätzlich sahen Hinckley und Widgor die Definition von dem was

elementar bedeutet als schwierig an. Beispielsweise ist die Positionierung mit der Maus auf dem Bildschirm eine 2D-Positionierung. Dieselbe Aufgabe mit einem Eingabegerät wie Etch-A-Sketch (siehe Abbildung 2.1) ist hingegen keine elementare Aufgabe mehr, da jede Achse separat eingegeben werden muss (Buxton, 1986).

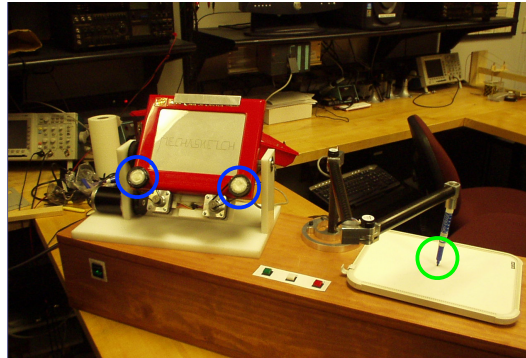


Abbildung 2.1.: Etch-A-Sketch Maltafel als Eingabegerät (Garcia-Rivera et al., 2003). Die Steuerung eines Stiftes (grün markiert) erfolgt achsenweise über zwei Drehknöpfe (blau).

Selektion

Bei der *Selektion* (*Select*) wählt der Benutzer aus einer Menge von Elementen ein bestimmtes Element aus. Die Menge kann beispielsweise aus *Befehlen* (*Commands*) bestehen. Eine typische Interaktionstechnik für die Selektion ist die Auswahl eines Eintrages aus einem Menü mit der Maus oder die Eingabe von Zahlen oder Buchstaben über eine Soft-Tastatur bei Multitouch-Displays.

Positionierung

Bei der *Positionierung* (*Position*) kennzeichnet der Benutzer einen Punkt auf dem interaktiven Display zur Platzierung eines Objektes an eine bestimmte Position in 1D, 2D oder 3D. Typische Interaktionstechniken für Positionierung ist die Verschiebung des Mauszeigers mit Hilfe der Maus oder eines Joystick. Diese Aufgabe setzt voraus, dass das Eingabegerät die benötigten Freiheitsgrade zur Verfügung stellt.

Orientierung

Bei der *Orientierung* (*Orient*) wird ein Objekt im 2D-Raum oder 3D-Raum durch den Benutzer rotiert. Eine typische Interaktionstechnik zur Orientierung ist die Veränderung der Orientierungswinkel eines Objekts über einen Joystick oder durch die direkte Eingabe der Winkel über eine Tastatur. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, müssen die Eingabegeräte mindestens die gleiche Anzahl an Freiheitsgraden aufweisen wie die geforderte Aufgabe.

Pfad

Ein *Pfad* (*Path*) wird durch den Benutzer generiert. Dies erfolgt über die Definition von Positions- oder Orientierungsaufgaben, die über einen bestimmten Zeitraum erfolgen sollen. *Pfad* ist trotz der Sequenz von Positionierungs- und Orientierungsaufgaben eine *elementare* Interaktionsaufgabe. Foley et al. gehen davon aus, dass diese Aufgabe durch die Zeitkomponente von den Benutzern als „anders“ im Sinne einer eigenen, nicht unterteilbaren Aufgabe wahrgenommen werden. Eine typische Interaktionstechnik ist die Simulation eines Flugzeugs über einem Terrain.

Quantifizierung

Als *Quantifizierung* (*Quantify*) wird die direkte Eingabe eines numerischen Wertes bezeichnet. Diese erfolgt in der Regel per Eingabe über die Tastatur.

Texteingabe

Die *Texteingabe* (*Text*) umfasst die Eingabe und Veränderung von Zeichenfolgen. Entscheidend ist, dass die Eingabe kein Befehl ist und somit keine Aktion auslöst. Sie dient der Eingabe von Informationen, die dann im Computer gespeichert werden. Typische Interaktionstechniken zur Texteingabe ist die Eingabe über die Tastatur oder die Auswahl von Zeichen über ein Menü oder ein Soft-Keyboard (Isokoski et al., 2010; MacKenzie und Zhang, 1999, 2001; Oulasvirta et al., 2013; Zhai et al., 2000).

2.2. Quantitative Analysen

Ein großes Teilgebiet der HCI ist die quantitative Analyse von Interaktionstechniken. Diese ermöglicht, sie untereinander zu vergleichen. Dazu gehören u. a. Performanz- und Effizienzanalysen. Grundlage der Performanzanalysen ist die Arbeit des Psychologen Paul Fitts aus dem Jahre 1954, in der er ein Modell für schnelle Armbewegungen des Menschen entwickelte (Fitts, 1954). Hier wurde erstmals die Maßeinheit *bits* zur Bewertung von menschlichen Bewegungen eingeführt. Damit wurde der theoretische Grundstein für den Performanz- bzw. Effizienzvergleich von menschlichen Bewegungen und Interaktionstechniken gelegt. Fitts' Konzepte *Index of Difficulty* (*ID*) und *Index of Performance* (*IP*) sind bis heute die Basis von Vergleichsstudien – auch die der vorliegenden Arbeit.

Aus diesem Grund wird im Folgenden Fitts' Arbeit und deren Bedeutung analysiert, bevor anschließend die Unterschiede zwischen Performanz- und Effizienzanalysen dargelegt werden.

2.2.1. Fitts' Gesetz: Die Grundlage der quantitativen Analysen

Die Arbeit von Paul Fitts mit dem Titel „The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement“ aus dem Jahre 1954 gilt bis heute als eins der robustesten Vorhersagemodelle für Interaktionszeiten (Fitts, 1954). Sie ist eine der am meisten zitierten Arbeiten im Bereich der HCI (Fitts, 1954; MacKenzie, 1991; Soukoreff und MacKenzie, 2004). Fitts stellte darin zwei revolutionäre Ideen vor, die es ermöglichen, Interaktionen quantitativ zu bewerten. Zum einen führte er erstmals *bits* als Einheit zur Bewertung der Schwierigkeit von menschlichen Bewegungen ein. Je höher diese Zahl, desto schwieriger die Bewegung und die damit verbundene Aufgabe. Zusätzlich schlug er vor, menschliche Bewegungen als eine Übertragung von Informationen über einen *menschlichen Übertragungskanal* zu interpretieren (MacKenzie, 1991). Grundlage für Fitts' Arbeit war die sechs Jahre zuvor publizierte Arbeit von Shannon (1948) zur Informationstheorie.

Shannons Theorem 17

Shannons Publikation war die erste Arbeit, die das Problem der Informationsübertragung in elektrischen Systemen mathematisch formulierte. Dabei wurden auch die Störungen auf dem Übertragungsweg sowie der dadurch verursachte Informationsverlust beschrieben. Dazu betrachtete Shannon ein allgemeines Kommunikationssystem bestehend aus fünf Komponenten (siehe Abbildung 2.2).

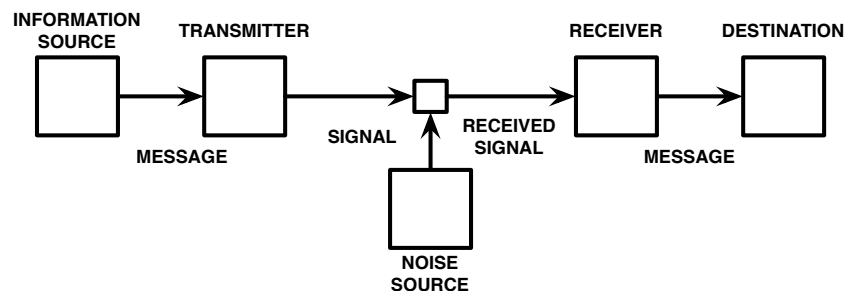


Abbildung 2.2.: Das Kommunikationssystem nach Shannon modelliert die Informationsübertragungen in elektrischen Systemen (Skizze angelehnt an Abbildung 1 aus Shannon (1948)).

Die erste Komponente des Systems ist die *Informationsquelle (Information Source)*, die die *Nachricht (Message)* erzeugt. Diese Nachricht wird zu einem *Sender (Transmitter)* weitergeleitet, der die Nachricht in ein übertragbares Signal umwandelt und über einen *Kanal (Channel)* zum *Empfänger (Receiver)* überträgt. Die Aufgabe des Receivers ist die Rückcodierung des übertragenen Signals in die Originalnachricht für das *Ziel (Destination)*. Ziele sind Objekte, wie Menschen oder Computer, für die die Nachricht bestimmt ist. Nachrichten können zum Beispiel eine Sequenz von Buchstaben für ein Telegramm sein oder komplexere Funktionen darstellen, die beispielsweise ein Fernsehbild beschreiben. Sender können zum Beispiel Telefongeräte sein, die den Schall in elektrische Signale umwandeln. Der Kanal ist ein Übertragungsmedium wie etwa ein Kabel oder ein Radio-Frequenzband.

Bei der Übertragung des Signals über den Kanal kommt es zu einem *Rauschen* oder zu *Störsignalen*, die zu einer Reduzierung der theoretischen maximalen Kanalbandbreite führen. Shannon nennt diese effektive Kanalbandbreite *Kanalkapazität* (C) und beschreibt sie in seinem Theorem 17 (Shannon und Weaver, 1949):

$$\begin{aligned} C &= B \cdot \log_2 \left(\frac{S + N}{N} \right) \\ &= B \cdot \log_2 \left(\frac{S}{N} + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

B ist dabei die maximale (theoretische) Kanalbandbreite. S ist die Signalstärke und N die Stärke des Rauschens. In diesem Zusammenhang führte Shannon auch erstmals den Begriff *binary digits (bits)* für eine übertragene Informationseinheit ein. Der Logarithmus zur Basis 2 ist willkürlich gewählt und sollte u. a. nur die Bezeichnung *bits* motivieren.

Fitts' revolutionäre Ideen

Angelehnt an Shannons Arbeit, stellte Fitts zwei revolutionäre Ideen vor. Zum einen schlug er vor, menschliche Bewegungen als eine Übertragung von Informationen über einen *menschlichen Übertragungskanal* zu interpretieren (MacKenzie, 1991). Menschliche Bewegungen mussten dabei folgende Eigenschaften aufweisen:

1. Die Bewegungen legen eine bestimmte *Distanz* A (*Amplitude*) zurück.
2. Die Bewegungen haben ein Ziel mit der *Zielgröße* W (*Width*).
3. Die Bewegungen mussten *schnellstmöglich* aber zugleich mit *möglichst wenig Fehlern* ausgeführt werden, dem sogenannten *Speed-accuracy Tradeoff*. Dies ist der Abgleich von Geschwindigkeit und Genauigkeit bei der Bearbeitung einer Aufgabe.

Mit diesen Überlegungen interpretierte Fitts den menschlichen Übertragungskanal analog zum Konzept des elektronischen Kommunikationssystems. So wurde die Distanz A äquivalent zum elektronischen Signal und die Zielgröße W der Bewegung äquivalent zum Rauschen verwendet. Zum anderen führte er als Erster ein quantitatives Maß für motorische Bewegungen ein. Er nannte sie *Index of Difficulty (ID)* und definierte sie analog zu Shannons Theorem 17 (siehe Gleichung 2.1):

$$ID = \log_2 \left(\frac{2 \cdot A}{W} \right) \quad (2.2)$$

Fitts fügte den Faktor 2 hinzu, um den Logarithmus-Term in seinen Versuchen nicht negativ werden zu lassen (siehe Abschnitt 2.2.1 auf Seite 24). Beispielsweise würde der Logarithmus bei der Konfiguration $A = 1$ und $W = 2$ ohne Korrektur -1 ergeben. Der Faktor 2 löst dieses Problem jedoch nur für die von ihm verwendeten Konfigurationen. Im Allgemeinen bleibt dieses Problem weiterhin bestehen, sodass andere Arbeiten weitere Lösungsvorschläge zur Anpassung des ID -Terms präsentieren (siehe Abschnitt 2.2.1 auf Seite 24).

Eine weit verbreitete und empfohlene Variante ist die sogenannte *Shannon-Formel*, die stark an Shannons Formel aus Gleichung 2.1 angelehnt ist. Sie hat den Vorteil keine negativen Werte für ID zu erzeugen und zudem bessere Ergebnisse für die Vorhersagen zu liefern (MacKenzie, 1991; Soukoreff und MacKenzie, 2004):

$$ID = \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) \quad (2.3)$$

Ähnlich wie Shannon schlug Fitts ebenfalls *bits* als Maßeinheit für ID vor¹. Nach Fitts' Idee musste genau diese Anzahl von *bits* innerhalb einer Bewegung übertragen werden, um die beabsichtigte Aufgabe zu lösen. Teilt man nun die Anzahl der übertragenen *bits* durch die Zeit, die dafür benötigt wurde, so erhält man die *Übertragungsrate* in *bits pro Sekunde* (*bits/s*). Die Übertragungsrate entspricht somit Shannons Konzept der *Kanalkapazität* und spiegelt die Performanz einer Bewegung wider. Fitts nannte sie *Index of Performance* (IP):

$$IP = \frac{ID}{MT} \quad (2.4)$$

MT (*Movement time*) ist die *Bewegungsdauer* oder *Ausführungszeit*, die benötigt wurde, um die Bewegung auszuführen.

Fitts' Studie

Fitts wollte mit seiner Studie ursprünglich klären, wovon die Geschwindigkeit von schnellen Armbewegungen abhängt bzw. welcher Faktor die Geschwindigkeit dieser Bewegungen einschränkt. Für ihn kamen zwei Möglichkeiten in Betracht:

1. Die Geschwindigkeit wurde eingeschränkt durch die Muskelaktivität.
2. Die Geschwindigkeit war durch die *maximale Informationsverarbeitung des Nervensystems* (*Kanalkapazität*) eingeschränkt.

Zur Untersuchung seiner Hypothesen führte Fitts eine Studie durch, die vier Aufgaben enthielt, die die Bewegung des Arms erforderten. Das Setup der Aufgaben war so gestellt, dass unterschiedliche Gliedmaßen und Muskelgruppen bei den Bewegungen eingesetzt werden mussten. Wichtig war dabei, dass bei der Durchführung der Aufgaben nach dem Prinzip *Genauigkeit vor Geschwindigkeit* vorgegangen wurde. Dies bedeutet, dass die Bewegungen mit der höchstmöglichen Geschwindigkeit ausgeführt werden sollten, aber gleichzeitig sollte die Fehlerquote so niedrig wie möglich bleiben (Speed-accuracy Tradeoff).

Ziel der ersten Aufgabe war es, zwei Metallplatten (*Zielfelder*) innerhalb von 15 Sekunden so oft wie möglich mit einem Stift zu berühren (siehe Abbildung 2.3a). Dabei sollte darauf geachtet werden, so wenige Fehler wie möglich zu produzieren. Als Fehler wurde gewertet, wenn das Zielfeld verfehlt wurde. Die Breite des Zielfeldes variierte zwischen 0.25, 0.50, 1 und 2 inch. Die Abstände betragen 2, 4, 8 und 16 inch. Aufgabe 2 war bis auf das Gewicht des Stiftes, identisch zur ersten Aufgabe. Im ersten Durchgang wog der eingesetzte Stift ca.

¹Beide begründen dies mit dem zweier Logarithmus. Würde man die Basis zehn nehmen, schlagen sie *digits* als Maßeinheit vor.

29 Gramm (1 oz.). Der Stift im zweiten Durchgang war mit etwa 456 Gramm (1 lb.) zwar deutlich schwerer, aber nur etwas größer. Der veränderte Stift sollte die unterschiedliche Arbeitsbelastung der Muskulatur untersuchen, ohne die Distanzen und Größe der Zielflächen zu verändern.

Bei Aufgabe 3 sollten die Versuchspersonen Plastikscheiben von einem Stapel auf einen anderen Stapel bewegen (siehe Abbildung 2.3b). Analog dazu mussten in Aufgabe 4 Stifte von einer Leiste auf eine nebenliegende Leiste gesteckt werden (siehe Abbildung 2.3c). In beiden Aufgaben variierten erneut die Abstände zwischen den Stapeln und Leisten sowie die Durchmesser der Plastikscheiben und Stifte.

Tabelle 2.4 zeigt die Ergebnisse aus Aufgabe 1. Es ist zu sehen, dass die Werte für ID zwischen 1 und 7 *bits* variiert und die Ausführungszeiten zwischen 180 ms und 731 ms liegen. Betrachtet man die Werte für IP , die über die Gleichung 2.4 berechnet wurden, so fällt auf, dass diese über bestimmte ID relativ konstant bleiben. Der durchschnittliche Wert für IP beträgt 10.10 *bits/s* ($SD = 1.33$ *bits/s*) und wird als *Informationsverarbeitungsrate* des menschlichen Bewegungssystems für speziell diese Aufgabe interpretiert (MacKenzie, 1991). Die Analyse der anderen Aufgaben ergab ähnliche Werte.

Trotz unterschiedlicher Gewichte blieb die Performanz bei Aufgabe 1 und 2 gleich. Deshalb sah Fitts seine Hypothese bestätigt, dass die Geschwindigkeit nicht von der Muskelbelastung, sondern von der Schwierigkeit der Aufgabe sowie der Kanalkapazität des menschlichen Bewegungsapparates abhängt. Zusätzlich konnte er zeigen, dass die Ausführungszeit sich mit der ID verändert, die IP aber über eine große Auswahl von Distanzen und Zielgrößen konstant bleibt. Das bedeutet, dass die Ausführungszeit nicht direkt von der Distanz und Zielgröße abhängt, sondern von deren Verhältnis.

Fitts' Gesetz

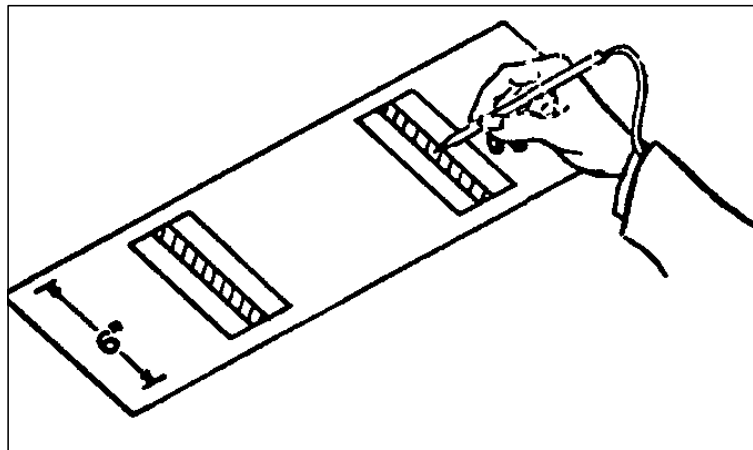
Damit war es nun auch möglich Ausführungszeiten vorherzusagen, wenn IP und ID bekannt sind. Dazu musste Gleichung 2.4 nur nach MT umgestellt werden:

$$MT = \frac{ID}{IP} \quad (2.5)$$

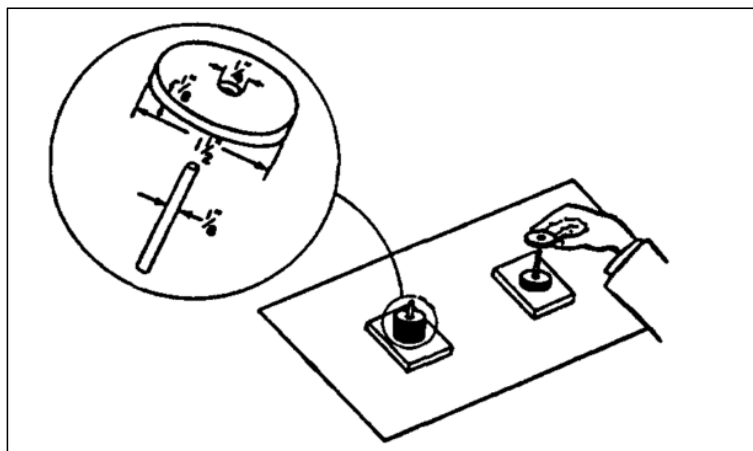
Die IP s für die jeweiligen ID können über Testreihen ermittelt werden. Dazu müssen Bewegungsaufgaben entworfen werden, bei der die Ausführungszeiten für verschiedene ID gemessen werden. Diese ID müssen dabei verschiedene Wertpaare für A und W verwenden. IP kann dann im Anschluss entweder über Gleichung 2.4 direkt berechnet oder mittels Regressionsanalyse ermittelt werden. Dabei ist MT die abhängige und ID die unabhängige Variable. Die daraus resultierende Regressionsgleichung mit den Regressionskoeffizienten a und b hat die folgende Form:

$$MT = a + b \cdot ID \quad (2.6)$$

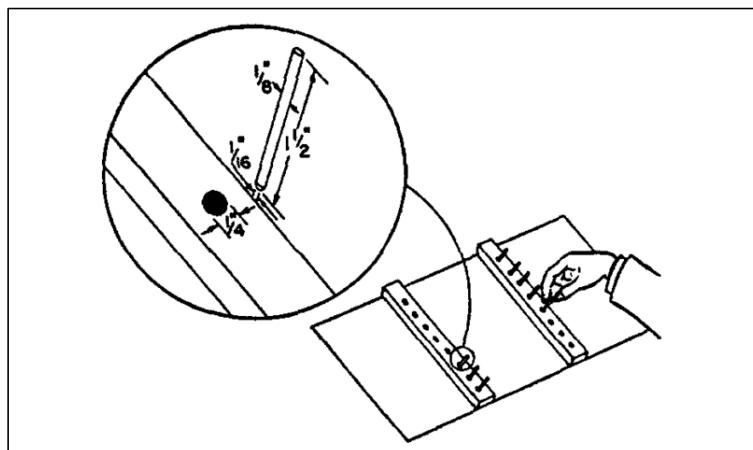
IP kann nun aus dem Kehrwert $1/b$ berechnet werden. Der Koeffizient a wird oftmals als *Fehlerterm* oder *Offset* der Bewegung interpretiert. Auch wenn in beiden Fällen die IP einer



(a) Tapping-Aufgabe



(b) Disc Transfer Aufgabe



(c) Pin Transfer Aufgabe

Abbildung 2.3.: Skizze der Originalversuche von Fitts (Fitts, 1954).

TABLE 1
 TASK CONDITIONS AND PERFORMANCE DATA FOR 16 VARIATIONS OF A
 RECIPROCAL TAPPING TASK
 ($N =$ the same 16 Ss at each condition)

Tolerance and Amplitude Conditions			1-oz. Stylus				1-lb. Stylus			
W_s	A	I_d	t	Errors (%)	I_p	Rank	t	Errors (%)	I_p	Rank
.25	2	4	.392	3.35	10.20	11	.406	3.80	9.85	7
.25	4	5	.484	3.41	10.33	9	.510	3.83	9.80	8
.25	8	6	.580	2.78	10.34	8	.649	4.04	9.24	13
.25	16	7	.731	3.65	9.58	14	.781	4.08	8.96	15
.50	2	3	.281	1.99	10.68	5	.281	0.88	10.68	4
.50	4	4	.372	2.72	10.75	3.5	.370	2.16	10.81	2
.50	8	5	.469	2.05	10.66	6	.485	2.32	10.31	6
.50	16	6	.595	2.73	10.08	12	.641	2.27	9.36	11
1.00	2	2	.212	0.44	9.43	15	.215	0.13	9.30	12
1.00	4	3	.260	1.09	11.54	1	.273	0.85	10.99	1
1.00	8	4	.357	2.38	11.20	2	.373	1.17	10.72	3
1.00	16	5	.481	1.30	10.40	7	.526	1.32	9.50	10
2.00	2	1	.180	0.00	5.56	16	.182	0.00	5.49	16
2.00	4	2	.203	0.08	9.85	13	.219	0.09	9.13	14
2.00	8	3	.279	0.87	10.75	3.5	.284	0.65	10.56	5
2.00	16	4	.388	0.65	10.31	10	.413	1.72	9.68	9

Abbildung 2.4.: Die Ergebnisse aus Aufgabe 1. W_s ist die Breite der Zielplatten in inch. A die Distanz zwischen den Mittelpunkten der beiden Platten. t ist die Durchschnittszeit in Sekunden, die benötigt wurde, um zwischen den beiden Platten zu wechseln. I_p ist der berechnete Index of Performance (Fitts, 1954).

Bewegung ermittelt wird, kann es aufgrund der unterschiedlichen Ermittlungsmethoden zu leicht unterschiedlichen Werten für IP kommen (MacKenzie, 1991; Soukoreff und MacKenzie, 2004).

Setzt man nun für ID den Term aus Gleichung 2.2 ein, so erhält man folgende Formel:

$$MT = a + b \cdot \log_2 \left(\frac{2A}{W} \right) \quad (2.7)$$

Auch wenn diese Formel in dieser Form nicht in Fitts' Arbeit auftaucht, wird sie dennoch als *Fitts' Gesetz* bezeichnet, da sie aus den fundamentalen Ideen aus Fitts' Arbeit abgeleitet wurde.

Bedeutung von Fitts' Gesetz für die HCI

Die häufigste Nutzung von Fitts' Gesetz ist die Verwendung als Vorhersagemodell für Interaktionszeiten und zum Vergleich von Eingabegeräten (Forlines et al., 2007; Sasangohar et al., 2009) oder Interaktionstechniken (Gillan et al., 1990; McGuffin und Balakrishnan, 2002). Es beschreibt die benötigte Zeit zum Erreichen einer Zielfläche als logarithmische Funktion in Abhängigkeit von der Entfernung zur Zielfläche und deren Größe. Konkret bedeutet dies, dass je präziser die geforderte Genauigkeit einer zielgerichteten Bewegung ist, desto größer ist die Reaktions- und Bewegungszeit. So dauert das Anstoßen und Ausführen einer Bewe-

gung zu einem kleinen Ziel (z. B. ein kleines Icon treffen) länger als eine Bewegung zu einem größeren Ziel (größeres Icon). Wenn die Konstanten a und b der Formel bekannt sind oder experimentell ermittelt wurden, kann die Interaktionszeit mit Fitts' Gesetz berechnet bzw. vorhergesagt werden. Indem die Schwierigkeit quantifiziert wird, können die Performanzen verschiedener Eingabegeräte direkt miteinander verglichen werden.

Seit Veröffentlichung der Arbeit im Jahre 1954 haben sich viele Forschungsarbeiten diesem Thema mit unterschiedlichen Schwerpunkten gewidmet. Sie gehört zu den am meisten zitierten Arbeiten im Bereich der HCI.

Fitts' Gesetz wurde bereits durch zahlreiche Arbeiten bestätigt. Diese Arbeiten werden u. a. in MacKenzie (1991) oder Soukoreff und MacKenzie (2004) zusammengefasst. Des Weiteren wurde unter anderem der *Zusammenhang zwischen Distanz und Zielgröße* in weiteren Arbeiten verifiziert (Fitts und Peterson, 1964; MacKenzie, 1992; MacKenzie und Isokoski, 2008; Soukoreff et al., 2011). Ebenso wurde Fitts' Gesetz zur Untersuchung *verschiedener Eingabemethoden* verwendet: Zum *Vergleich von Stylus Stiften und Soft-Keyboards auf Multitouch-Geräten* (Dunlop und Levine, 2012; Soukoreff und MacKenzie, 1995), für die *Texteingabe mittels beider Daumen* (Clarkson et al., 2007; MacKenzie und Soukoreff, 2002; Oulasvirta et al., 2013) oder *verschiedener Eingabegeräte* (Card et al., 1978). Auch wurden mithilfe von Fitts' Gesetz *neue Tastaturlayouts* untersucht und konzipiert (MacKenzie und Zhang, 1999; Rick, 2010; Zhai et al., 2000, 2002).

Eine große Forschergruppe widmet sich auch der *Anpassung und Erweiterung von Fitts' Gesetz*. Diese zielt auf *bestimmte Personengruppen* wie Menschen mit Behinderung oder sonstigen Einschränkungen (Frett und Barner, 2005; Gajos et al., 2007; Wobbrock und Gajos, 2007) sowie *unterschiedliche Altersgruppen* (Hourcade et al., 2004). Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit der Anpassung von Fitts' Gesetz zur *Berechnung der ID im Allgemeinen* (Soukoreff et al., 2011; Zhai et al., 2004) oder für *Bewegungen in 2D* (Accot und Zhai, 2003; Hoffmann und Sheikh, 1994; MacKenzie und Buxton, 1992; Zhang et al., 2012) bzw. für *Bewegungen in 3D* (Grossman und Balakrishnan, 2004; Hoffmann et al., 2011). Auch werden Anpassungsvorschläge der *ID zur Vorhersage der zu erwartenden Fehler (Error-Model)* (Wobbrock et al., 2008a), des *Logarithmus-Terms* (Goldberg et al., 2013), der *Berechnung der Performanz (Throughput)* (Wobbrock et al., 2011) oder zur *Vereinfachung von Fitts' Gesetz* (Guiard et al., 2011) gemacht. Bi et al. (2013) passten Fitts' Gesetz für die *Vorhersage von Finger-Touch-Eingaben* an.

Auch zu Untersuchung und Vergleich von *unterschiedlichen Eingabegeräten* wird Fitts' Gesetz verwendet. Dazu gehören *Touchpads, optische Mäuse, Trackballs, Tablets und Stylus* (Casiez et al., 2008; Epps, 1986; Forlines et al., 2007; MacKenzie und Oniszczak, 1998; MacKenzie et al., 1991; Sasangohar et al., 2009). Ebenso *Eyetracker* (Miniotas et al., 2004; Vertegaal, 2008; Ware und Mikaelian, 1987; Zhang und MacKenzie, 2007), *sensorbasierte Systeme* (Stoelen und Akin, 2010), *Videogamecontroller* (Natapov et al., 2009) sowie *taktile Feedback Eingabegeräte* (Forlines und Balakrishnan, 2008). Es finden sich auch Untersuchungen zu verschiedenen Eingabemodalitäten wie die *Neigung des Geräts* (MacKenzie und Teather, 2012) und die *Rotation des Handgelenks* (Crossan et al., 2008).

Mit Fitts' Gesetz wurde auch die *Performanz von unterschiedlichen kinematischen Ketten* untersucht: Balakrishnan und MacKenzie (1997) stellten fest, dass kinematische Ketten un-

terschiedliche Performanzen aufweisen; Langolf et al. (1976) zeigten, dass Finger eine höhere Performanz aufweisen als Arme. Fitts' Gesetz wurde umformuliert, um Armbewegungen in 2D mithilfe eines *Polar-Koordinatensystem* darzustellen und zu bewerten (Yang et al., 2001). Auch die Performanz von komplexeren Aufgaben wie die *Pfadnavigation mit festen Breiten* wurde untersucht (Accot und Zhai, 1999).

Ebenso wurden *konkrete Interaktionsszenarien* untersucht: *Pointing* (Balakrishnan, 2004; Banovic et al., 2013; Fares et al., 2013; Gillan et al., 1990), *Selektion auf Touchgeräten* (Albinsson und Zhai, 2003; Bi et al., 2013; Cockburn et al., 2012), *Selektion in 3D* (Grossman und Balakrishnan, 2004; Teather und Stuerzlinger, 2013; Wang et al., 2011). Des Weiteren *Rotation und Translation (Dragging)* (Crossman und Goodeve, 1983; Gillan et al., 1990; Smits-Engelsman et al., 2002; Stoelen und Akin, 2010) sowie eine *Kombination aus Translation und Rotation* (Stoelen und Akin, 2010; Zhao et al., 2015). Auch Untersuchungen für neue Interaktionsformen bauen auf Fitts' Studie und Idee auf – wie die *Fore- and Backinteraction*, d. h. die Verwendung der *Vorder- und Rückseite von Geräten* (Wobbrock et al., 2008b). Auch zur *Modellierung von deiktischer Interaktion* durch akustische Signale (Marentakis und Brewster, 2006) oder von *Rotationsbewegungen aus dem Unterarm* (Kondraske, 1994) wurde Fitts' Gesetz angepasst und evaluiert.

Ein wichtiges Ziel der Forschung rund um Fitts' Gesetz ist die Untersuchung von *User-Interface (UI) Elementen*. Diese sollen verbessert oder gegebenenfalls Alternativen entwickelt werden. *Menüs* (Ahlström, 2005; Cockburn et al., 2007; Isokoski, 2004), *Selektionsmethoden* (Blanch und Ortega, 2011; Kabbash und Buxton, 1995) werden basierend auf Fitts' Gesetz angepasst. Gleiches gilt für die *Platzierung von Objekten* für eine bessere Sichtbarkeit (Po et al., 2004), Verbesserungen von *Scrolling-Techniken* (Andersen, 2005; Hinckley et al., 2002) sowie die *Erreichbarkeit von Icons durch Vergrößerung* (McGuffin und Balakrishnan, 2002) oder *Änderung des Selektionsparadigmas* (Guiard et al., 2004).

Fitts' Gesetz ermöglicht *konkrete UI-Design Vorschläge* wie zum Beispiel die optimale Steuerung von Soundsynthesizer Parametern (Tubb und Dixon, 2015). Die hardwaretechnischen Zusammenhänge wie der Einfluss von Latenz-Zeiten von Multitouch-Geräten auf die Performanz und Effizienz von Dragging-Interaktionen werden untersucht (Jota et al., 2013). Weitere Studien untersuchen die *Ermüdung und Performanz* durch verschiedene Formfaktoren wie Tablet, Multitouch-Wand usw. (Bachynskyi et al., 2015), *Flexible-Displays* (Dijkstra et al., 2011) oder *mehrere Bildschirme* (Hutchings, 2012).

2.2.2. Performanz vs. Effizienz

Performanz und *Effizienz* werden häufig synonym verwendet (Accot und Zhai, 1999; Bi et al., 2013; Jacob et al., 1994). Diese Arbeit unterscheidet zwischen Performanz und Effizienz. Effizienz bezieht sich auf die Ausführungszeit einer Interaktion. Performanz basiert auf Fitts' Definition, die sie als Übertragungsrate der Information in *bits/s* beschreibt (siehe Abschnitt 2.2.1).

Effizienz

Effizienz wird im *ISO 9241-11*-Standard definiert als „der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“. Konkret bedeutet dies, dass der Benutzer mit der vorhandenen Systemfunktionalität in der Lage sein muss, die anstehenden Aufgaben zuverlässig und mit möglichst wenig Aufwand zu lösen. Damit steht die Effizienz immer im Verhältnis zur Effektivität. Effektivität ist die „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der [ein] Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ kann. Das heißt, die vorliegenden Aufgaben sind mit dem vorliegenden System möglichst vollständig und korrekt zu lösen. Effizienz wird in der Regel an der Zeit gemessen, die benötigt wurde, um die Aufgabe zu lösen (Frøkjær et al., 2000). Weitere Maße sind beispielsweise auch Klickzahlen (Kruger et al., 2005), Länge der Mauswege oder die Anzahl der geschriebenen Wörter pro Minute (MacKenzie und Zhang, 1999).

Nach Soukoreff und MacKenzie (2004) müssen bei der Erhebung der Messwerte zur Ermittlung der Effizienz mehrere Messzeitpunkte beachtet werden. Auf diese Weise sollen Verzerrungen vermieden werden. Aus diesem Grund werden für diese Arbeit folgende Messzeitpunkte definiert (siehe Abbildung 2.5):

- *P (Presentation)* ist der Zeitpunkt, an dem die komplette Konfiguration präsentiert wird und der Versuch gestartet werden kann.
- *R (Reaction)* ist der Zeitpunkt, an dem der Benutzer den Versuch startet. Dies geschieht zum Beispiel, indem er den Finger aufsetzt oder das Objekt bewegt.
- *E (Enter Target)* bezeichnet den Zeitpunkt, an dem das zu verschiebende Objekt (Finger, Zeiger usw.) erstmals den Rand des Zielobjektes erreicht.
- *F (Final)* steht für den Zeitpunkt, an dem der Versuch beendet und eingeloggt wird.

Zwischen diesen Messzeitpunkten liegen folgende Zeitspannen:

1. *RT (Reaction Time)* ist die Zeitspanne zwischen den Messpunkten *P* und *R* und bezeichnet die Reaktionszeit, die der Benutzer braucht, bis er den Versuch startet.
2. *DT (Distance Time)* ist die benötigte Zeit, bis das zu verschiebende Objekt zum ersten Mal den Rand des Zielobjektes erreicht.
3. *CT (Correction Time)* ist die Zeitspanne, bis der Benutzer den Versuch beendet hat.
4. *MT (Movement Time)* ist die Zeitspanne, in der das Objekt bewegt wird und ergibt sich aus der Summe aus *DT* und *CT*.

Diese Zeitspannen sind notwendig, um saubere Daten zu erhalten. So ist es notwendig die *Reaction-Time (RT)* aus den Daten herauszunehmen, da diese die Daten verfälschen können (Soukoreff und MacKenzie, 2004).

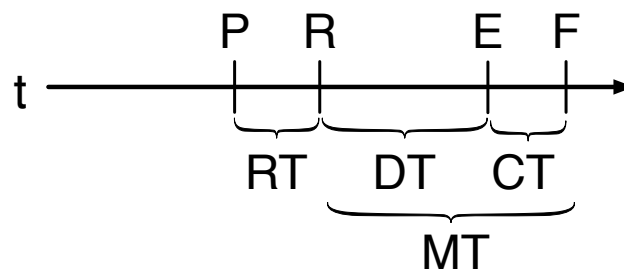


Abbildung 2.5.: Die in dieser Arbeit verwendeten Messzeitpunkte. Presentation (P), Reaction (R), Enter Target (E) und Final (F) definieren verschiedene Zeitspannen: Reaction Time (RT), Distance Time (DT), Correction Time (CT) und Movement Time (MT).

Performanz

In der Literatur werden überwiegend zwei mathematische Definitionen für Performanz verwendet: Zum einen die Originalidee der *IP* nach Fitts über den Quotienten von *ID* und *MT* ($IP = ID / MT$). Zum anderen die Idee spätere Formulierung von Fitts', die Zhai (2004) in seiner Arbeit untersucht. Dieses Performanzmaß wird über den Kehrwert der Steigung der Regressionsgeraden ($1/b$) berechnet. Diese ist nach Zhai der ursprünglichen Formulierung von Fitts vorzuziehen. Begründet wird dies durch die Unabhängigkeit des Maßes von der *ID*. Nachteil beider Vorgehensweisen ist die Nichtbeachtung der individuellen Fähigkeiten und Aufgabendurchführung. Beispielsweise werden die Genauigkeit der Durchführung und die individuellen Fehlerquoten nicht beachtet, obwohl diese einen Einfluss auf die abgebildete Performanz haben.

Aus diesem Grund empfehlen Soukoreff und MacKenzie (2004) zur Analyse der Performanz den *Mean-of-means Throughput (TP)*. Dieser berücksichtigt sowohl die Ausführungszeit als auch die Genauigkeit der Ausführung und bildet die Performanz der unterschiedlichen Versuchspersonen besser ab. *TP* relativiert somit die Effizienz an der individuellen Aufgabenausführung. Er verwendet die tatsächlich zurückgelegten Bewegungsdistanzen der Benutzer anstelle der Werte aus den Konfigurationen. Dieser Ansatz wird im Allgemeinen akzeptiert und weitgehend in der Forschung verwendet (Bachynskyi et al., 2015; Soukoreff und MacKenzie, 2004; Stoelen und Akin, 2010).

Berechnet wird *TP* durch folgende Formel:

$$TP = \frac{1}{y} \sum_{i=1}^y \left(\frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \frac{ID_{e_{ij}}}{MT_{ij}} \right) \quad (2.8)$$

wobei y die Anzahl der Versuchspersonen und x die Konfigurationen sind. MT_{ij} ist die Durchschnittszeit über alle Versuche der Versuchsperson i für Konfiguration j . Der Term $ID_{e_{ij}}/MT_{ij}$ ist äquivalent zu Fitts' *IP*, mit der Ausnahme, dass die sogenannte *effective ID* (ID_e) verwendet wird. Die Einheit von *TP* ist wie *IP* ebenfalls *bits/s*.

ID_e berücksichtigt das tatsächliche, effektive Verhalten der Benutzer während der Aufgabenausführung. Dies ist notwendig, da sich die Endpunkte der Bewegungen über die Versuche hinweg voneinander unterscheiden. Diese bilden die tatsächliche Distanz und Größe der Zielfläche nicht immer ab. Dadurch sind Fehlerquote und Genauigkeit über die einzelnen ID nicht konsistent. Zusätzlich neigen die Versuchspersonen dazu, bei leichter ID zu *schummeln*. Sie führen die Bewegung nicht schnell genug aus oder gehen nicht die ganze Distanz ab. Bei nahen und großen Zielen wird die Bewegung häufig mit Erreichen des Toleranzbereiches am Rand der Zielflächen beendet. Solche Bewegungen können Fitts' Gesetz kompromittieren, da dieses nur für schnelle Bewegungen gilt. Aus diesem Grund sollten Werte für Distanz (A) und Toleranz (W) angepasst werden. Damit sind sie innerhalb Fitts' Gesetz keine Konstanten mehr (MacKenzie, 1991, 1992).

Um die individuelle Genauigkeit der einzelnen Personen zu berücksichtigen, schlagen Soukoreff und MacKenzie basierend auf MacKenzie (1991, 1992) zwei Wege vor.

Erstens: Liegen die Daten zur Streuung der effektiven Endpunkte für jede Konfiguration vor, so kann die Standardabweichung σ zu den tatsächlichen Zielpunkten berechnet werden. Die Standardabweichung σ bildet somit die *overshoots* und *undershoots* der individuellen Bewegungen über das Mittel ab. *Overshoots* sind Versuche, bei denen die Endposition zwar innerhalb der Zielfläche, aber hinter dem anvisierten Ziel liegen. Bei *undershoots* liegen die Endpunkte vor dem anvisierten Ziel. Damit kann die *effektive Breite der Zielfläche* (W_e) definiert werden als

$$W_e = 4.133 \cdot \sigma. \quad (2.9)$$

Zweitens: Liegen die Daten zu den Endpunkten und somit auch deren Standardabweichungen zu den Zielpunkten nicht vor, kann die Korrektur der Genauigkeit über die Fehlerrate mit folgender Formel approximiert werden:

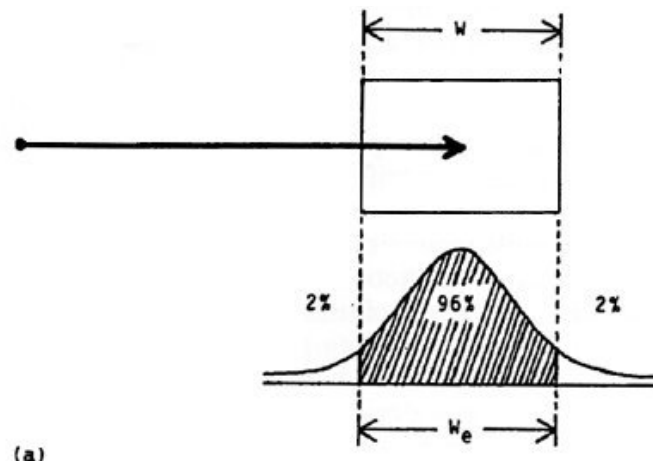
$$W_e = \begin{cases} W \times \frac{2.066}{z(1 - Err/2)} & , \text{ wenn } Err > 0.0049\%, \\ W \times 0.5089 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (2.10)$$

Err ist die Fehlerrate für die jeweilige Konfiguration und z die inverse Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung, d. h. z berechnet den Wert, bei dem $(100-Err)$ Prozent der Fläche unter der Gaußschen Verteilungskurve der Standardnormalverteilung liegt. Die Konstanten 2.066 und 0.5089 leitet MacKenzie (1991) aus der Entropie der Standardnormalverteilung ab² (siehe Abbildung 2.6).

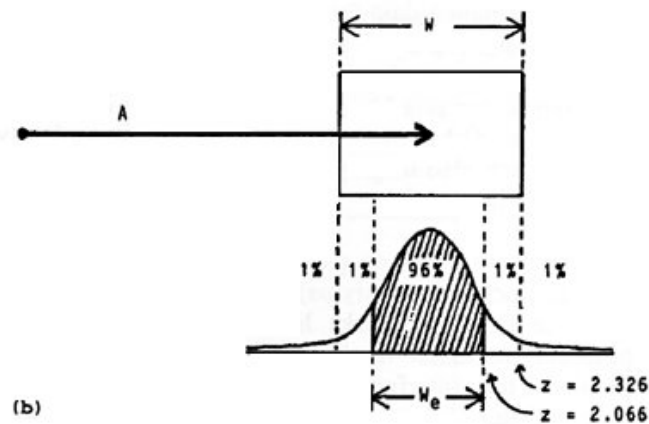
Zusätzlich sollte nach Möglichkeit die tatsächlich durchgeführte effektive Distanz D_e mitgespeichert werden, sodass die tatsächlichen Endpunkte berücksichtigt werden können. Liegen die Daten für D_e vor, kann die effektive ID_e berechnet werden über

$$ID_e = \log_2 \left(\frac{D_e}{W_e} + 1 \right). \quad (2.11)$$

²Die genaue Herleitung der Konstanten 2.066 und 0.5089 kann in der Arbeit von MacKenzie (1991) nachgelesen werden.



(a) Fehlerrate 4 %



(b) Fehlerrate 2 %

Abbildung 2.6.: Approximation der Fehlerrate. Die Breite der Zielfläche W wird auf eine effektive Breite W_e korrigiert, sodass 96 % der Zielfläche innerhalb der Normalverteilung liegen (4 % Fehlerquote). In (a) liegt die Fehlerquote bei 4 %, sodass keine Anpassung notwendig ist: $W = W_e$. In (b) beträgt die Fehlerquote nur 2 %, sodass die effektive Zielfläche schmaler ist als die tatsächliche Zielfläche, wenn die Fehlerquote wieder auf 4 % normalisiert wird (MacKenzie, 1991).

Liegen diese Werte nicht vor, wird der Wert aus der Konfiguration verwendet:

$$ID_e = \log_2 \left(\frac{A}{W_e} + 1 \right). \quad (2.12)$$

Durch die Verwendung der effektiven Breite W_e ist TP unabhängig und robust gegen den Speed-accuracy Tradeoff, da die individuellen Faktoren und Vorgehensweisen bei der Aufgabendurchführung innerhalb der Berechnung berücksichtigt wurden.

2.2.3. Fazit

Die umfangreichen Arbeiten zu Fitts' Gesetz zeigen die Notwendigkeit eines Modells in der HCI. Erst solche Modelle ermöglichen den objektiven Vergleich und Analyse von Interaktionstechniken.

2.3. Skelettbasierte Animation

Der folgende Abschnitt beschreibt die Grundlagen und Schwierigkeiten bei der Animation eines 3D-Skeletts und bereitet das in Kapitel 4 entwickelte System zur Animation eines virtuellen Arms vor. Alle räumlichen Beschreibungen des entwickelten Systems gehen von einem rechtshändigen Koordinatensystem mit folgenden positiven Ausrichtungen der Achsen aus: Die x-Achse verläuft von links nach rechts. Die y-Achse verläuft von unten nach oben. Die positive z-Achse zeigt in Richtung des Betrachters – also aus dem Display heraus (siehe Abbildung 2.7).

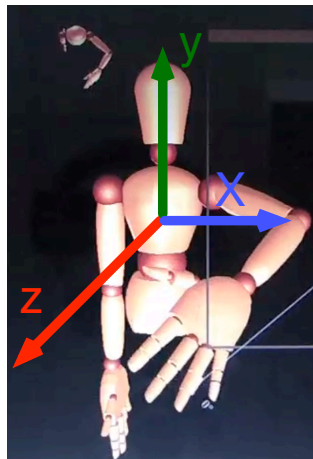


Abbildung 2.7.: 3D-Aufteilung des hier verwendeten rechtshändigen Koordinatensystems. Die z-Achse verläuft vom Ursprung in Richtung des Betrachters.

2.3.1. Animationstechniken

Animation ist nach Parent (2001) die Bewegung von Objekten, die sich von selbst nicht bewegen können. Dies wird in der Regel durch einen Animierer durchgeführt, indem er bestimmt, wie das Objekt sich über die Zeit im Raum bewegen soll. Dabei stellt die Echtzeit-Animation von menschenähnlichen Charakteren ein besonderes Teilgebiet dar (*Character-Animation*). Heutige Animationen werden überwiegend mit Hilfe von computergestützten Systemen realisiert. Hierbei werden traditionell zwei Arten der Animation unterschieden: Erstens die sogenannte *Straight-Ahead Action* und die *Pose-to-Pose Action (Keyframe-Animation)* (Lasseter, 1987).

Bei der *Straight-Ahead Action* wird eine Szene ohne Vorplanung Bild für Bild gezeichnet, bis die Endpose oder das Ende der Szene erreicht wird. Ist hingegen ein genaues Timing der Bewegungen erforderlich, wird auf die Keyframe-Technik gesetzt. Dabei werden zuerst die Schlüsselposen skizziert und erst im Anschluss die Zwischenposen hinzugefügt. Heutige computergestützte Animationen setzen überwiegend auf die Keyframe-Animation. Dabei erstellt und berechnet der Computer die Zwischenposen, die jedoch je nach eingesetzter Technik unterschiedliche Fehler enthalten können. Beispielsweise könnte die Bewegungsrichtung falsch sein oder es kann zur Überlagerung von Objekten kommen. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse immer manuell überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Zusätzlich setzen heutige Animationen auch auf *Motion-Capture*-Verfahren (Hodgins et al., 1999) – insbesondere bei der Animation komplexer 3D-Charaktere. Das wichtigste Merkmal dieser Technik ist der hohe Grad der Interaktivität und der Realismus der Bewegungen. Dazu werden Bewegungen eines menschlichen Schauspielers mit Hilfe von optischen *Markern (Tracker)* aufgezeichnet und im nächsten Schritt auf die 3D-Modelle übertragen.

Alternativ erlaubt *Character-Animation* die direkte Steuerung von Skelettstrukturen. Sie ermöglicht dadurch effiziente und kreative Ansätze von Animationstechniken. Eine solche Technik ist zum Beispiel die sogenannte *Performance-Animation*. Diese ist ebenso eine interaktive Methode zur Character-Animation, kann jedoch im Gegensatz zu Motion-Capture die Skelettstrukturen in Echtzeit steuern. Das Ergebnis wird direkt umgesetzt und grafisch angezeigt. Diese Art der Animation ermöglicht spontane und improvisierte Explorationen von Ideen. Dies steht im Gegensatz zum traditionellen Pose-to-Pose-Ansatz, wobei jede Pose einzeln erstellt wird und sich die Animation durch das Abspielen der Einzelbilder ergibt. Dies erfordert jedoch eine aufwendigere Vorplanung der Animation (Thomas und Johnston, 1995).

2.3.2. Aufbau eines Skelettes

Ein Skelett ist im Kontext der Computer-Animation eine hierarchische Anordnung von Gelenken, die ein oder mehrere DoF haben (Magenat-Thalmann et al., 2008). Für gewöhnlich wird ein Skelett als baumartige Struktur modelliert, sodass die Abhängigkeiten innerhalb eines Skeletts direkt ersichtlich sind (siehe auch Abschnitt 3.4). Beispielsweise ist aus der hierarchischen Struktur des Arms ersichtlich, dass die Hand mit dem Handgelenk verbunden ist, das Handgelenk mit dem Unterarm und dieser wiederum mit dem Ellbogen. Dabei ist jedes Gelenk ein Knoten mit einem eigenen lokalen Koordinatensystem. Dieses Koordinatensystem ist wiederum relativ in das Koordinatensystem des Elternknotens integriert. Dies bedeutet, dass die Bewegung des Elternknotens (z. B. der Schulter) die Bewegung aller Kinderknoten (z. B. Ellbogen, Handgelenk) impliziert. Die Anzahl und Auswahl der eingesetzten Gelenke richten sich nach dem Einsatzfeld. Beispielsweise benötigen medizinische Anwendungen eventuell alle Wirbelknochen der Wirbelsäule, während bei Computerspielen auch eine geringere Anzahl von Gelenken ausreichend ist. Die Reduzierung auf die notwendigsten Gelenke ist empfehlenswert, da bei automatischen Posenberechnungen die Komplexität der Berechnung mit der Anzahl der Gelenke steigt. Jede Pose ist über die

Ausrichtung aller Gelenke eindeutig definiert und kann somit zu jeder Zeit reproduziert werden.

Als *kinematische Kette* bezeichnet man ein über Gelenke verbundenes, bewegliches System aus einzelnen Gliedern. Die Gelenke können dabei unterschiedliche DoF haben. In dieser Arbeit wird von einer kinematische Kette mit hierarchischer Struktur ausgegangen. Abbildung 2.8 illustriert den menschlichen Arm (links) und die Darstellung als hierarchische Struktur (rechts), bei der die Schulter die Wurzel ist. Oberarm und Ellbogen sind direkte Unterknoten der Schulter, Unterarm und Handgelenk direkte Unterknoten des Ellbogens. Bei hierarchischen Strukturen beeinflussen die Bewegungen einzelner Gelenke die Ausrichtung der nachfolgenden Gelenke und Glieder. Wird beispielsweise die Schulter bewegt, so verändert dies auch automatisch die Position der darunter liegenden Elemente.

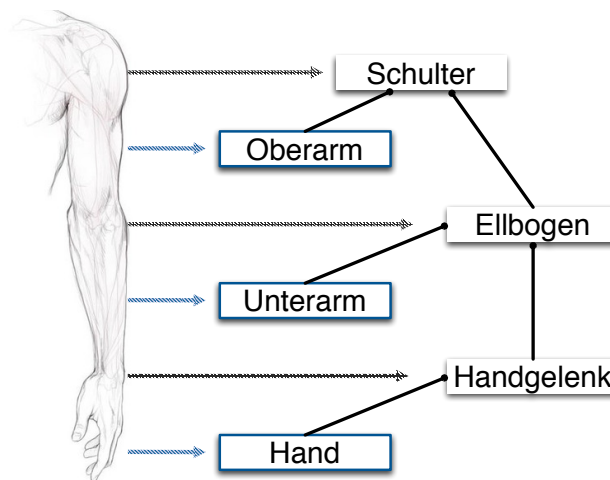


Abbildung 2.8.: Kinematische Kette mit entsprechender hierarchischer Struktur. Die Abbildung illustriert eine kinematische Kette am Beispiel eines menschlichen Arms (links) und einer dazugehörigen hierarchischen Struktur (rechts). Die Schulter ist die Wurzel der Struktur. Wird die Schulter verändert, so hat dies direkte Auswirkungen auf die darunter liegenden Elemente.

2.3.3. Manipulation eines Skelettes

Die Veränderung der Pose eines hierarchisch aufgebauten Skeletts kann auf zwei Arten erfolgen: Entweder wird jedes Gelenk separat manipuliert (*Forward Kinematics, FK*) oder nur der *End-Effektor* wird in die gewünschte Position gebracht (*Inverse Kinematics, IK*). Bei FK wird jedes Gelenk nacheinander gezielt verändert, bis die gewünschte Pose erreicht ist. Dadurch ist jede erstellte Pose über die Winkelstellungen der Gelenke eindeutig definiert (Maestri, 2006). Bei IK wird eine Pose über die Positionierung des End-Effektors erreicht. Dies beinhaltet eine automatische Neuausrichtung der Gelenke der zugehörigen kinematischen Kette. Dies geschieht durch die Neuberechnung der Gelenkparameter der Elternknoten (Welman, 1993).

Die für diese Studie gewählte Animationsaufgabe ist ausschließlich mit IK möglich. Denn IK hat den Vorteil, dass sie die Animation und das Erstellen von Posen deutlich vereinfacht,

da hierbei nur noch ein Objekt verändert werden muss und das Neuausrichten mehrerer Gelenke entfällt. IK hat im Vergleich zu FK zwei klare Nachteile. Zum einen gibt es im Gegensatz zu FK-Algorithmen keine eindeutigen Lösungen. Zum anderen können bei IK inakzeptable Lösungen in Form von anatomisch unmöglichen Bewegungen entstehen, wie Abbildung 2.9 illustriert. Es gibt zahlreiche IK-Algorithmen, die zusätzlich in numerische und analytische Verfahren unterteilt werden (Tolani et al., 2000). In dieser Arbeit wurde *Cyclic Coordinate Descent (CCD)* ein IK-Algorithmus zur schnellen IK-Berechnung verwendet (Welman, 1993). Der implementierte Algorithmus stammt von Lander (1998), der aufgrund der Einfachheit und guten Ergebnissen für diese Aufgabe bestens geeignet ist.

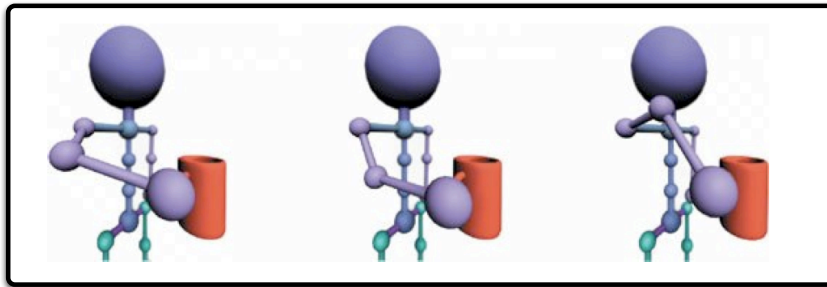


Abbildung 2.9.: Auswirkung der nicht eindeutigen Lösungen der Inverse Kinematics (IK). IK kann akzeptable (links und mitte) sowie inakzeptable Posen erzeugen, die der menschlichen Anatomie widersprechen (rechts) (Maestri, 2006).

Verwandte Arbeiten

„Man kommt nicht weit, wenn man nicht ganz von vorn beginnt.“

Indisches Sprichwort

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über relevante Arbeiten in der Mensch-Computer-Interaktions-Forschung (Human-Computer-Interaction, HCI), die in Bezug zu dieser Dissertation stehen. Es handelt sich dabei um Arbeiten, die Untersuchungen von Interaktionstechniken für Multitouch durchführen oder die Integration von Multitouch in die Computerarbeitsumgebung vorantreiben.

3.1. Vorhersagemodelle

Dieser Abschnitt stellt die in der HCI bekanntesten Vorhersagemodelle neben Fitts' Gesetz vor. Ebenso werden die Arbeiten vorgestellt, die die Grundlage für die Studien der nachfolgenden Kapitel liefern. Ein Überblick über die wichtigsten Erweiterungen und Arbeiten zu Fitts' Gesetz findet sich in Abschnitt 2.2.1 in Kapitel 2.

3.1.1. Allgemeine Vorhersagemodelle

Hicks-Hyman Gesetz Das *Hicks' Gesetz* beschreibt die Zeit, die benötigt wird, um eine Auswahl zu treffen. Diese Zeit steht dabei in Abhängigkeit zur Anzahl der zur auswahlstehenden Objekte. Sie hat die allgemeine Form:

$$RT = b \cdot \log_2(n + 1) \quad (3.1)$$

RT ist die zu erwartende Zeit für die Auswahl bei n gleichwahrscheinlichen Alternativen. Die Variable b stellt die Übertragungsrate äquivalent zu Fitts' IP dar. Hicks addiert 1 hinzu, um die Möglichkeit abzudecken, keine der Alternativen zu wählen. $\log_2(n + 1)$ ist äquiva-

lent zu Fitts' *ID* und bezeichnet die Informationsmenge in *bits*, die verarbeitet werden muss um eine aus n Alternativen auszuwählen.

Hyman erweiterte Hicks' Arbeit und konnte zeigen, dass bei ungleichen Wahrscheinlichkeiten ein linearer Zusammenhang zwischen der Reaktionszeit und der übertragenen Informationsmenge besteht (Hyman, 1953):

$$RT = a + b \cdot \sum_i^n p_i \log_2(1/p_i + 1) \quad (3.2)$$

wobei RT die Reaktionszeit ist. a und b sind die experimentell ermittelten Konstanten, wobei a oftmals als Zeit interpretiert wird, um das gewählte Objekt zu selektieren (z. B. durch Betätigen eines Knopfes). b ist die Übertragungsrate. p_i ist die Wahrscheinlichkeit von Alternative i , wenn es n nicht gleichwahrscheinliche Alternativen gibt.

Das *Hicks-Hyman* Gesetz wird oft in Kombination mit Fitts' Gesetz zur Vorhersage und Evaluation der Performanz von Menüs verwendet (Cockburn et al., 2007; Soukoreff und MacKenzie, 1995). Es hat aber aufgrund einiger Schwächen nicht dieselbe Popularität in der HCI erreicht wie Fitts' Gesetz. Eine der Schwächen ist die schwierige Generalisierbarkeit des Modells (MacKenzie, 1991; Seow, 2005). MacKenzie und Zhang (2001) konnten mit ihrer Studie beispielsweise die vorherige Arbeit von Soukoreff und MacKenzie (1995) nicht bestätigen. Sie vermuteten, dass das Hicks-Hyman Gesetz zur Vorhersage von Nutzern mit Expertenwissen nicht geeignet ist.

GOMS *GOMS* oder auch *CMN-GOMS* wurde erstmals 1983 von Card et al. vorgestellt. *GOMS* steht für „goals, operators, methods and selection rules“ (*Ziele, Operatoren, Methoden und Selektionsregeln*) (Card et al., 1983). Damit können quantitative Vorhersagen für Interaktionen auf theoretischer Ebene durchgeführt werden, ohne explizite Experimente oder Studien durchführen zu müssen.

Dazu wird die Interaktion in folgende vier Aktionen unterteilt, die sowohl kognitiv und physisch als auch perzeptiv sein können:

- *Ziele* beschreiben die übergeordneten Gesamtziele, die der Benutzer erreichen möchte. Diese Ziele können zusätzlich in weitere Unterziele unterteilt sein. Diese müssen abgearbeitet werden, um das Gesamtziel erfolgreich abzuschließen.
- *Operatoren* sind mögliche Handlungen, die durch die Software definiert sind, wie zum Beispiel Klicken, Maus bewegen usw. Es können auch kognitive Operatoren wie *nachdenken* definiert werden. Die Ausführungszeiten der Operatoren werden dabei approximiert, geschätzt oder beruhen auf statistischen Werten. Die Genauigkeit der *GOMS*-Vorhersagen sind daher stark von der Genauigkeit dieser Abschätzungen abhängig.
- *Methoden* sind Kombinationen oder Verkettungen von Operatoren oder Unterzielen, die zum Erreichen des Gesamtziels notwendig sind.

- *Selektionsregeln* bilden das Wissen des Benutzers ab und beschreiben die unterschiedlichen Methoden ein Ziel oder Unterziel zu erreichen. Der Unterschied zwischen Ziel und Operatoren liegt in der Granularität. Ziele beinhalten Methoden, die wiederum aus Operatoren bestehen. Operatoren sind atomar und können nicht weiter aufgesplittet werden.

Abbildung 3.1 illustriert ein Beispiel für die Analyse mit der Originalvariante CMN-GOMS.

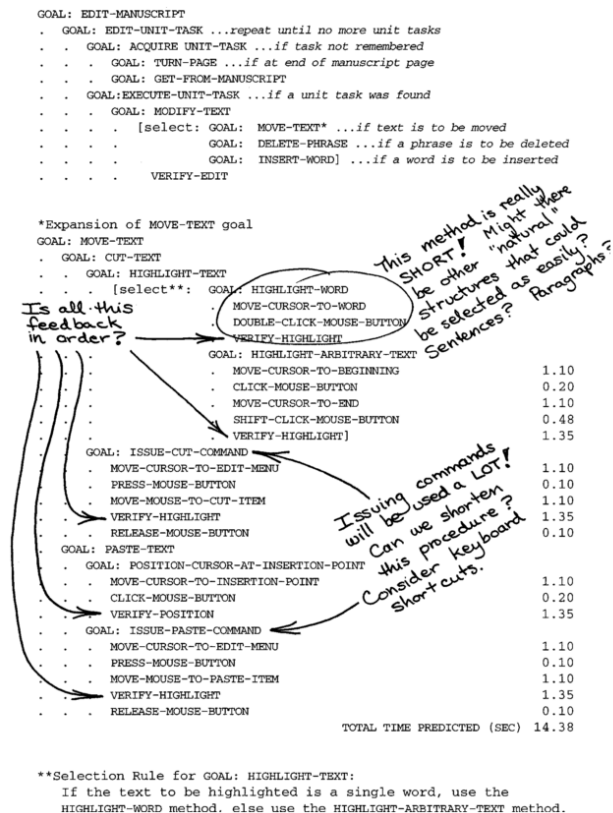


Abbildung 3.1.: Beispielanalyse mit CMN-GOMS (John und Kieras, 1996). Berechnung der benötigten Zeit zur Verschiebung eines Textes innerhalb einer Textverarbeitung.

Neben der Originalvariante CMN-GOMS gibt es noch weitere Dialekte wie *Keystroke-Level Model (KLM)*, *Natural GOMS Language (NGOMSL)* und *Cognitive-Perceptual-Motor GOMS (CPM-GOMS)* (John und Kieras, 1996).

KLM ist eine vereinfachte Variante von CMN-GOMS mit nur sechs Operatoren (Card et al., 1983):

- **K:** Betätigen einer Taste oder eines Knopfs.
- **P:** Bewegen der Maus zu einem Ziel auf dem Display.
- **H:** Bewegen der Hand zur Tastatur oder Maus.
- **D:** Zeichnen einer Linie auf einem Raster.

- M: Mentale Vorbereitung auf eine Aktion.
- R: Wartezeit des Benutzers auf das System.

Abbildung 3.2 zeigt die eine Beispielanalyse mit KLM.

Moving text with the MENU-METHOD		
Description	Operator	Duration (sec)
Mentally prepare by Heuristic Rule 0	M	1.35
Move cursor to beginning of phrase (no M by Heuristic Rule 1)	P	1.10
Click mouse button (no M by Heuristic Rule 0)	K	0.20
Move cursor to end of phrase (no M by Heuristic Rule 1)	P	1.10
Shift-click mouse button (one average typing K)	K	0.28
(one mouse button click K)	K	0.20
Mentally prepare by Heuristic Rule 0	M	1.35
Move cursor to Edit menu (no M by Heuristic Rule 1)	P	1.10
Press mouse button	K	0.10
Move cursor to Cut menu item (no M by Heuristic Rule 1)	P	1.10
Release mouse button	K	0.10
Mentally prepare by Heuristic Rule 0	M	1.35
Move cursor to insertion point	P	1.10
Click mouse button	K	0.20
Mentally prepare by Heuristic Rule 0	M	1.35
Move cursor to Edit menu (no M by Heuristic Rule 1)	P	1.10
Press mouse button	K	0.10
Move cursor to Paste menu item (no M by Heuristic Rule 1)	P	1.10
Release mouse button	K	0.10
TOTAL PREDICTED TIME		14.38

Handwritten annotations on the right side of the table:

- mark text to be moved (bracketed around the first four rows)
- TWO commands needed to complete a move. Should we consider a MOVE command instead? (with arrows pointing to the 'Shift-click' and 'Click mouse' rows)
- issue CUT command (bracketed around the 'Press mouse' and 'Move cursor to Cut menu' rows)
- indicate insertion point (bracketed around the 'Mentally prepare' and 'Move cursor to insertion point' rows)
- issue PASTE command (bracketed around the 'Mentally prepare' and 'Move cursor to Edit menu' rows)
- Issuing commands will be used a LOT! Can we shorten this procedure? Consider keyboard shortcuts. (with arrows pointing to the 'Mentally prepare' and 'Move cursor to Edit menu' rows)

Abbildung 3.2.: Beispielanalyse mit KLM (John und Kieras, 1996). Berechnung der benötigten Zeit zur Verschiebung eines Textes innerhalb einer Textverarbeitung.

NGOMSL ist eine strengere, restriktivere Variante, die die Vorhersagen von Operatorsequenzen, Ausführungszeiten und Zeiten zum Lernen der Methoden erlaubt (Kieras, 1988). Dabei geht der Analyst von oben nach unten durch. In jeder Stufe geht er wiederum in die Breite (*breadth-first*) und splittet die übergeordneten Ziele in Methoden auf. Dies wird solange wiederholt, bis nur noch primitive Operatoren auf der Keystroke-Level-Ebene vorliegen (siehe Abbildung 3.3).

CPM-GOMS basiert auf dem *Model Human Processor (MHP)* (Card et al., 1983), der die menschliche Informationsverarbeitung modelliert. CPM-GOM kann als einziger GOMS-Dialekt parallele menschliche Handlungen und Kognitionen berücksichtigen. CPM-GOMS startet mit der CMN-GOMS-Analyse auf Operatorebene, die sequentiell stattfinden. Anschließend wird überprüft welche Operatoren oder Methoden parallel ausgeführt werden können. CPM-GOMS ist von den hier vorgestellten und bekannten Dialekten, die am schwierigsten zu modellierende Vorgehensweise (John und Kieras, 1996).

Der Nachteil der GOMS-Modelle liegt darin, dass nur die Nutzbarkeit aber nicht die Funktionalität des Systems berücksichtigt wird. Ebenso werden keine individuellen Differenzen wie Ermüdung oder Expertisen betrachtet, sondern es wird mit den gleichen Werten

NGOMSL Statements	Executions	External Operator Times
Method for goal: Move text	1	
Step 1. Accomplish goal: Cut text.	1	
Step 2. Accomplish goal: Paste text.	1	
Step 3. Return with goal accomplished.	1	
Method for goal: Cut text		
Step 1. Accomplish goal: Highlight text.	1	
Step 2. Retain that the command is CUT, and accomplish goal: Issue a command.	1	
Step 3. Return with goal accomplished.	1	
Method for goal: Paste text		
Step 1. Accomplish goal: Position cursor at insertion point.	1	
Step 2. Retain that the command is PASTE, and accomplish goal: Issue a command.	1	
Step 3. Return with goal accomplished.	1	
Selection rule set for goal: Highlight text	1	
If text-is word, then accomplish goal: Highlight word.		
If text-is arbitrary, then accomplish goal: Highlight arbitrary text.	1	
Return with goal accomplished.	1	
Method for goal: Highlight word		
Step 1. Determine position of middle of word.	1	
Step 2. Move cursor to middle of word.	1	
Step 3. Double-click mouse button.	1	
Step 4. Verify that correct text is selected	1	
Step 5. Return with goal accomplished.	1	
Method for goal: Highlight arbitrary text		
Step 1. Determine position of beginning of text.	1	1.20
Step 2. Move cursor to beginning of text.	1	1.10
Step 3. Click mouse button.	1	0.20
Step 4. Determine position of end of text. (already known)	1	0.00
Step 5. Move cursor to end of text.	1	1.10
Step 6. Shift-click mouse button.	1	0.48
Step 7. Verify that correct text is highlighted.	1	1.20
Step 8. Return with goal accomplished.	1	
Method for goal: Position cursor at insertion point		
Step 1. Determine position of insertion point.	1	1.20
Step 2. Move cursor to insertion point.	1	1.10
Step 3. Click mouse button.	1	0.20
Step 4. Verify that correct point is flashing	1	1.20
Step 5. Return with goal accomplished.	1	
Method for goal: Issue a command		
Step 1. Recall command name and retrieve from LTM the menu name for it, and retain the menu name.	1	
Step 2. Recall the menu name, and move cursor to it on Menu Bar.	1	1.10
Step 3. Press mouse button down.	1	0.10
Step 4. Recall command name, and move cursor to it.	1	1.10
Step 4. Recall command name, and verify that it is selected.	1	1.20
Step 5. Release mouse button.	1	0.10
Step 6. Forget menu name, forget command name, and return with goal accomplished.	1	

Predicted Pure Procedure Learning Time for 44 statements + 6 LTM chunks = 784 sec
 Total Predicted Execution Time = 16.38 sec

Issuing commands will be used a LOT! Can we shorten this procedure? Consider keyboard shortcuts.

All this feedback seems appropriate

WM usage seems appropriate

If users can't remember menu name, will they have to search when all p. Or can they guess?

Abbildung 3.3.: Beispielanalyse mit NGOMSL (John und Kieras, 1996). Berechnung der benötigten Zeit zur Verschiebung eines Textes innerhalb einer Textverarbeitung.

für die Durchführungszeiten gerechnet. Auch werden keine Fehler modelliert, da immer von einer perfekten Interaktion ausgegangen wird. Zudem können bis auf CPM-GOMS die Methoden und Operatoren nur sequentiell modelliert werden.

3.1.2. Anpassungen an Fitts' Gesetz

Steering Gesetz Accot und Zhai (1997) stellten in ihrer Arbeit erstmals das sogenannte *Steering Gesetz* vor. Dieses Gesetz beschreibt die Bewegung durch einen begrenzten Pfad und wurde von Fitts' Gesetz abgeleitet. Es besitzt folgende allgemeine Form:

$$T_C = a + b \int_C \frac{1}{W(s)} ds \tag{3.3}$$

T_C beschreibt die Zeit, die benötigt wird, um einen Pfad C (Tunnel) durchzugehen. $W(s)$ ist die Breite des Tunnels zum Zeitpunkt s und ds die Differentialfunktion. a und b sind wie bei Fitts experimentell ermittelte Konstanten. Der Integral-Term beschreibt äquivalent zu Fitts die ID der Aufgabe.

Accot und Zhai untersuchten in ihrer Arbeit drei verschiedene Pfade und konnten zeigen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der benötigten Zeit und der ID besteht. Abbildung 3.4 illustriert die untersuchten Pfade. *Steering Law* kann verwendet werden, um die Zeit vorherzusagen, die benötigt wird, um sich durch ein hierarchisches Menü zu bewegen (siehe Abbildung 3.4d). Die erste Phase kann dabei als *Fitts Problem* angesehen werden, bei dem ein Ziel (Menüeintrag) getroffen werden muss. In der zweiten Phase muss ein in der Breite begrenzter Pfad abgegangen werden, um das dazugehörige Untermenü zu erreichen. Diese Aufgabe kann als *Steering Problem* aufgefasst werden. Dieses Gesetz konnte in weiteren Arbeiten verifiziert (u. a. Accot und Zhai, 1999, 2001) und erweitert werden (Pastel, 2006).

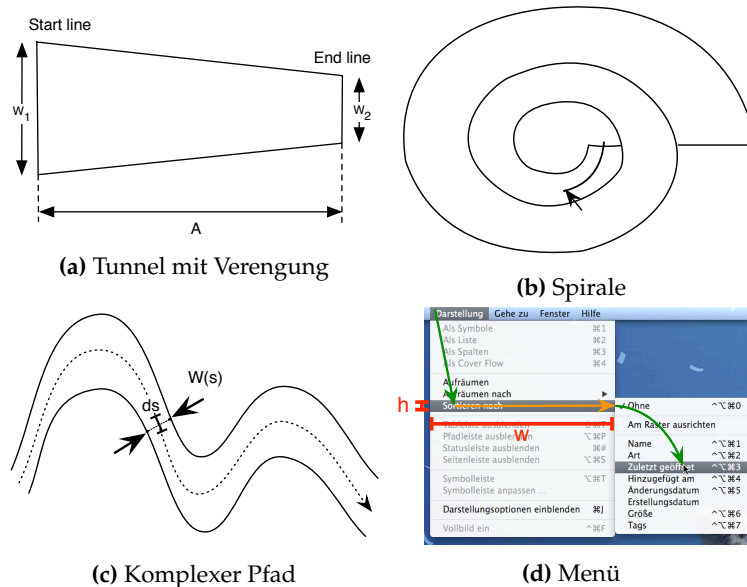


Abbildung 3.4.: Skizzen der untersuchten Pfade mit unterschiedlichen Breiten und Bewegungsmustern (Accot und Zhai, 1997). Abbildungen (a)–(c) zeigen die unterschiedlichen Bewegungsmuster innerhalb unterschiedlich komplexer Pfade. Ein hierarchisch aufgebautes Menü kann als Kombination von *Fitts*- (grün) *Steering Problem* (orange) aufgefasst werden (d).

Crossman und Goodeve (1983) Crossman und Goodeve führten Fitts Studien durch, um die Bewegungspfade und das Beschleunigungsverhalten zu untersuchen. Die Ergebnisse für Translationsbewegungen zeigten, dass die Beschleunigungskurve ein Gaußsches Integral abbildet (siehe Abbildung 3.5b). Die Autoren vermuteten aber, dass die Bewegung nicht kontinuierlich abläuft, sondern aus einer Reihenfolge von beschleunigten Bewegungen mit kurzen Impulsen besteht (siehe Abbildung 3.5a). Den Grund sehen die Autoren darin, dass die kurzen Intervalle dazu dienen, den Verlauf der Armbewegung zum Ziel hin zu korrigieren. Die Vermutung der nicht kontinuierlichen Bewegung untersuchen die

Autoren anschließend an Rotationsbewegungen. Bei den Aufgaben wurde der Ellbogen aufgestützt und die Bewegung nur aus dem Unterarm ausgeführt (siehe Abbildung 3.5c). Diese Einschränkung sollte dazu führen, dass die Bewegung kürzere Impulse erzeugt und die Messungen dadurch feingranularer werden.

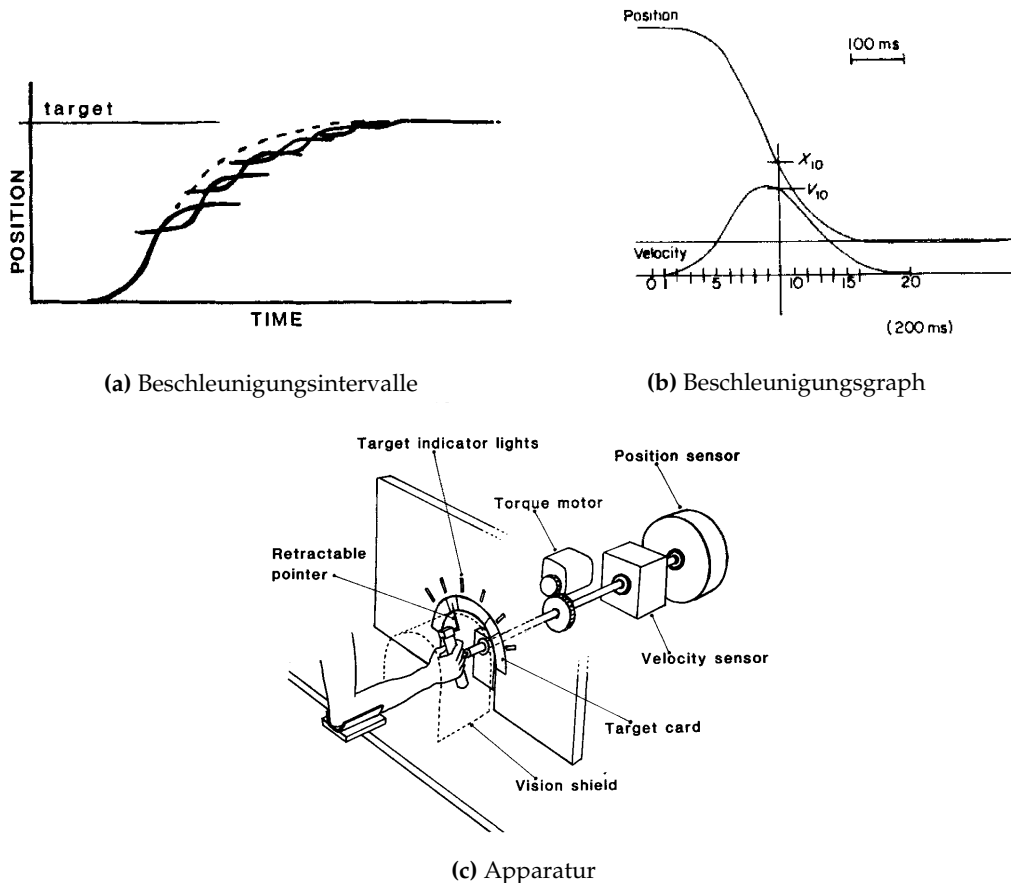


Abbildung 3.5.: Illustration der Bewegungsintervalle und des Setup zur Durchführung der Rotationsexperimente (Crossman und Goodeve, 1983). Die kurzen Beschleunigungsintervalle (a) werden als einen durchgehenden Graph wahrgenommen (b). Die Apparatur und das Setup zur Durchführung der Rotationsexperimente zeichnen Position und Beschleunigung mithilfe von Potentiometer und Tachometer elektrisch auf (c).

Mit ihren Versuchen konnten die Autoren zeigen, dass Rotationsbewegungen aus Sequenzen von kleinen separaten Impulsen bestehen. Dieses Verhalten konnten sie auch unter weiteren Bedingungen beobachten. Beispielsweise wurde den Probanden das visuelle Feedback entzogen, indem nur ein Streifen von etwa 40° vor und nach dem Ziel die Sicht erlaubte. In der restlichen Zeit war der Zeiger verdeckt. Obwohl der Zeiger nicht sichtbar war, wurden die Impulse zum Ziel hin geringer, nachdem sie am Anfang stärker begannen. Die Autoren vermuteten daher, dass die Versuchspersonen den Zeiger trotz der Verdeckung „sehen“ konnten, d. h. dass sie in der Lage sind, ihre aktuelle Position zu erraten. Zusätzlich zeigte sich, dass die Versuchspersonen nur wenige Versuche brauchten, um sich an eine

nicht angekündigte Beschleunigung des Zeigers zu gewöhnen, sodass sie ihre Bewegungen an das neue Verhalten des Zeigers anpassen konnten.

Stoelen und Akin (2010) Stoelen und Akin untersuchten die Frage, wie die Ausführungszeiten einer Interaktion, die aus Translation und Rotation besteht (RT), mit Hilfe einer Anpassung von Fitts' Gesetz vorhergesagt werden kann. Unter der Annahme, dass Translation und Rotation gleichschwer sind, schlagen sie eine Anpassung von Fitts' Gesetz vor. Gleichschwer bedeutet, dass beide Interaktionen ähnliche Werte für IP aufweisen. In diesem Fall schlagen sie folgende Anpassung vor:

$$\begin{aligned} MT_{\text{kombiniert}} &\approx a_{\text{kombiniert}} + b [ID_{\text{rotation}} + ID_{\text{translation}}] \quad \text{mit} & (3.4) \\ ID_{\text{rotation}} &= \log_2 \left(\frac{\alpha}{\omega} + 1 \right) \quad \text{und} \\ ID_{\text{translation}} &= \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) \end{aligned}$$

$MT_{\text{kombiniert}}$ steht dabei für die Ausführungszeit einer kombinierten Bewegung und α und ω für die Winkel der Rotationsbewegung. A steht für die Distanz und W für die Breite des Zielobjektes bei der Translation. Konkret bedeutet dies, dass die Ausführungszeit für RT berechnet wird, indem die ID der Einzelaufgaben addiert werden und als ID für die kombinierte Interaktion verwendet wird.

Um ihre Hypothese empirisch zu untersuchen, führten sie Studien nach Fitts' Design durch. Zu diesem Zweck wurden drei unabhängige Aufgaben durchgeführt (siehe Abbildung 3.6): Translation, Rotation und RT. Dabei verwendeten sie ein sensorbasiertes System, um die Bewegungen zu erfassen und untersuchten nur Rechtsbewegungen. Dabei führte die rechte Hand die Bewegungen aus, während die linke Hand die Trials beendeten. Ein Trial wurde beendet, indem die Versuchspersonen einen Knopf drückten, sobald sie das Gefühl hatten innerhalb der Zielfläche zu sein (siehe Abbildung 3.6d).

Zum Vergleich der Schwierigkeiten führten Stoelen und Akin Regressionsanalysen über die Durchschnittswerte der Ausführungszeiten für jede Interaktion durch. Anschließend wurden Steigung und Schnittpunkt jeder Regressionsgeraden verglichen. Zusätzlich berechneten sie die Regressionsgerade $RT_{\text{generiert}}$. Berechnet wird $RT_{\text{generiert}}$ über die *Datenwolke* aus den Werten, die sich ergeben, wenn die Durchschnittszeiten von Translation und Rotation in ein Koordinatensystem abgetragen werden (siehe Abbildung 3.7). $RT_{\text{generiert}}$ simuliert somit die Vorhersagezeiten des angepassten Modells von Stoelen und Akin. Zusätzlich berechneten die Autoren, unter der Annahme, dass die ID der Einzelaktionen aufaddiert werden dürfen, die *Means-of-means TP* nach Soukoreff und MacKenzie (2004) (siehe Gleichung 2.8).

Die Vergleiche zeigten für alle Interaktionen ähnliche Werte für Steigung, Schnittpunkt und TP . Die Werte wichen im Schnitt nur ca. 4% voneinander ab. Die Steigung der generierten Regressionsgeraden stimmte bis auf 0.5% mit den gemessenen Werten für RT überein. Daraus schlussfolgern Stoelen und Akin, dass die Schwierigkeit von Translation und Rotation gleich ist und ihre Anpassung von Fitts' Gesetz somit zulässig ist.

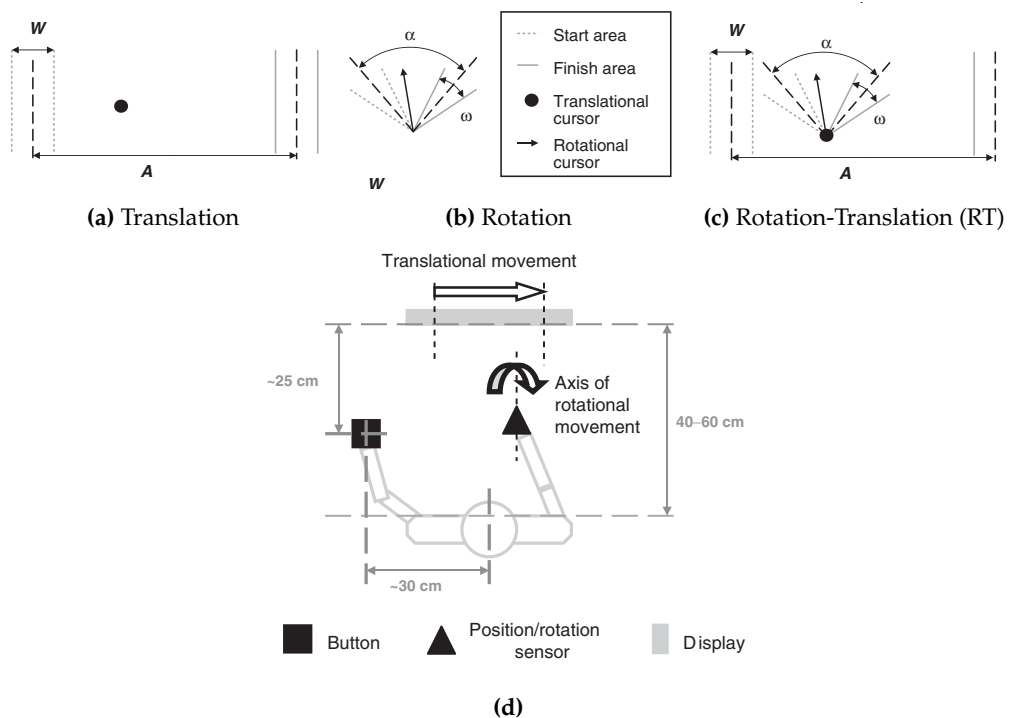


Abbildung 3.6.: Visuelle Darstellung der Aufgaben und des Versuchsaufbaus (Stoelen und Akin, 2010). Der Versuchsaufbau (d) zeigt eine bimanuale Bedienung bei der die linke Hand einen Knopf bedient und die rechte Hand die Aufgaben ausführt.

	Schnittpunkt	Steigung	R^2	TP
Translation	0.22	0.31	0.984	3.17 bits/s
Rotation	0.27	0.32	0.930	3.02 bits/s
RT	0.46	0.32	0.817	3.28 bits/s
$RT_{\text{generiert}}$	0.50	0.32	0.953	3.17 bits/s

Tabelle 3.1.: Werte der Regressionsanalyse (Stoelen und Akin, 2010). $RT_{\text{generiert}}$ wurde aus den Durchschnittszeiten von Translation und Rotation berechnet.

Zhao et al. (2015) Zhao et al. adressieren in ihrer Arbeit zwei Probleme die sich bei kombinierten Interaktionen, die Translation, Rotation und Skalierung ergeben. Das erste Problem betrifft die Nicht-linearität von bei der Beschreibung von Skalierung. Vergrößert man beispielsweise ein Objekt mit dem Skalierungsfaktor $s_1=1$ nach $s_2=2$, so beträgt der Unterschied $\Delta s = s_2 - s_1 = 1$. Verkleinert man ein Objekt hingegen auf die Hälfte ($s_1 = 1; S_2 = 0.5$), so ergibt sich ein $\Delta s = -0.5$. Dieser Unterschied erscheint nicht intuitiv. Dies zeigt sich noch stärker bei einer zweifachen Vergrößerung. Bei einer zweifachen Vergrößerung des Objektes würde sich ein $\Delta s = 2$ aus $\Delta s_1 + \Delta s_2 = 1 + 1 = 2$ ergeben. Betrachtet man diese Aktion hingegen als eine Aktion und nicht als zwei aufeinanderfolgende Aktionen, so ergibt sich durch $s_1 = 1$ und $s_2 = 4$ ein $\Delta s = 3$. Bei Translation sind beide Aktionen hingegen äquivalent. Zwei hintereinander ausgeführte Translationen von 10 cm entsprechen einer Translation von 20 cm. Als Lösung schlagen sie einen Umwandlungsalgorithmus vor, der auf der Arbeit von Guiard und Beaudouin-Lafon (2004) basiert. Diese Beschreiben das

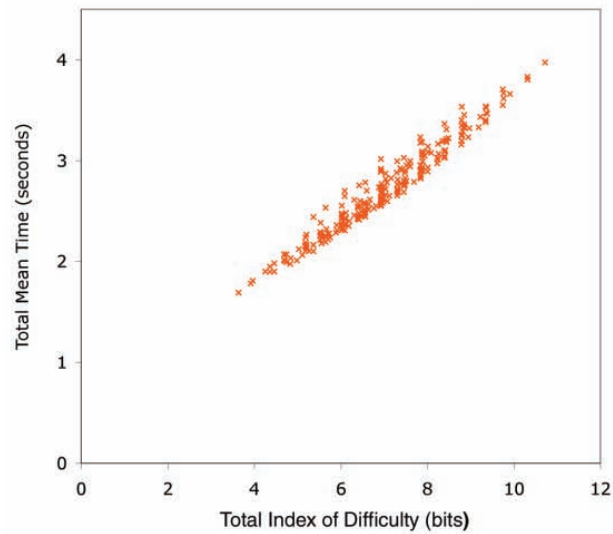


Abbildung 3.7.: Durchschnittszeiten der Einzelinteraktionen für Translation und Rotation (Stoelen und Akin, 2010). Diese Zeiten wurden zur jeweiligen *ID* eingetragen. Sie dienen zur Berechnung der Regressionsanalyse für $RT_{\text{generiert}}$.

Verhältnis der Skalierung mithilfe des Logarithmus. Am oben genannten Beispiel zeigt sich, dass dieser Ansatz intuitivere Werte liefert: $\log_2 2 - \log_2 1 = 1$ und $\log_2 0.5 - \log_2 1 = -1$.

Das zweite Problem sehen die Autoren in den unterschiedlichen Maßeinheiten zwischen den Bewegungen. Die Veränderung der Translation um eine Einheit ist nicht äquivalent zu der Veränderung der Rotation um eine Einheit. Dies erschwert den Vergleich zwischen den Bewegungen. Hier schlagen Zhao et al. gewichtete euklidische Distanzen vor, die die einzelnen Faktoren durch unterschiedliche Koeffizienten normalisieren. Dieser Ansatz wurde bereits von Accot und Zhai (2003) und Grossman und Balakrishnan (2004) vorgeschlagen, um 2D und 3D-Pointing zu modellieren. Zur Anpassung von unterschiedlichen Maßeinheiten wurde sie bisher noch nicht eingesetzt. Zhao et al. verwenden diesen Ansatz und definieren die Distanz D aus Fitts' *ID*-Formulierung um:

$$D = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2) + \alpha \Delta \theta^2 + \beta \Delta s^2} \quad (3.5)$$

mit $\Delta x = x_1 - x_2$, $\Delta y = y_1 - y_2$, $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$ und $\Delta s = \log_2 s_1 - \log_2 s_2$. Die Koeffizienten α und β normalisieren die Werte der Maßeinheiten. Zhao et al. schlagen vor die Breite W ebenfalls mit diesem Ansatz zu formulieren.

Zur Überprüfung ihres Ansatzes führen sie zwei Studien durch. In beiden Studien mussten die Versuchspersonen eine Matchingaufgabe mit einer unimanualen Interaktionstechnik durchführen (siehe Abbildung 3.8). Dabei durften sie Daumen mit Mittel- oder Zeigefinger einsetzen, um das zu manipulierende Objekt zu positionieren, zu rotieren und zu skalieren. Variiert wurden bei den Trials die Distanz der Translation, die Winkel der Rotation und die Skalierungsfaktoren. Die Größe der Zielobjekte blieben konstant. Studie 1 und Studie 2 unterschieden sich in der Anzahl der Konfigurationen. Gemessen wurde Ausführungszeit

und Fehlerrate. Die Ausführungszeit begann sobald die Oberfläche berührt wurde. Beendet wurde sie mit dem Ende eines Trials.

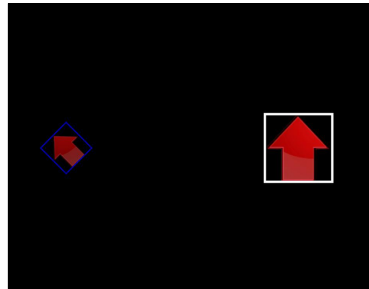


Abbildung 3.8.: Visuelle Darstellung der Versuchsaufgabe aus der Studie von Zhao et al. (2015). Das zu manipulierende Objekt (blauer Rahmen) musste über Translation, Rotation und Skalierung in ein Zielobjekt (weißer Rahmen) überführt werden.

Die Ergebnisse zeigten einen Anstieg der Ausführungszeiten bei Erhöhung der Werte für Translation, Rotation und Skalierung. Ebenso zeigte sich, dass die Translationsrichtung einen Einfluss auf die Zeiten hatte. So sind die nahen Interaktionen in Richtungen E, SE, und S niedriger als bei weiter entfernten Interaktionen in Richtungen W, NW, und N. Bei der Fehlerrate: Mehr Fehler bei entfernteren Interaktionen und Richtungen (NW, N und NE). oder in Richtung des Körpers (SE, S, NW).

Die Verifizierung ihres Modells anhand der gemessenen Daten zeigte eine hohe Validität ($R^2 = 0.90$ und $R^2 = 0.91$). Die Anwendung des Modells von Stoelen und Akin (2010) auf ihre Daten zeigten eine niedrige Korrelation von $R^2 = 0.79$ (Daten aus Studie 1) bzw. $R^2 = 0.77$ (Studie 2). Somit konnte das Modell von Stoelen und Akin (2010) für Multitouch bei Bewegungen mit Rotation, Skalierung und Translation nicht bestätigt werden.

3.1.3. Fazit

Die allgemeinen Vorhersagemodelle verwenden nur Approximationen zur Vorhersage von Ausführungszeiten, sodass diese zu ungenau sind. Sowohl Stoelen und Akin als auch Crossman und Goodeve vergleichen die Schwierigkeit von Translation und Rotation jedoch nicht für Multitouch. Zhao et al. führen Studien für Interaktionen mit Rotation-Skalierung-Translation durch, vergleichen diese aber nicht untereinander. Da beispielsweise das Modell von Stoelen und Akin die gleiche Schwierigkeit von Translation und Rotation voraussetzt, untersucht diese Arbeit, aufbauend auf der Studie von Stoelen und Akin, erstmals die Schwierigkeit von Translation und Rotation für Multitouch (Kapitel 7).

3.2. Multitouch

3.2.1. Interaktionsaufgaben

Ein Überblick über die Grundlagen findet sich in Kapitel 2. Dieser Abschnitt stellt Interaktionstechniken vor, die die Interaktionsaufgaben nach Foley et al. (1984) implementieren (siehe auch Abschnitt 2.1.3, Seite 19). Die Interaktionsaufgaben sind Selektion, Positionierung, Orientierung, Pfad, Quantifizierung und Texteingabe. In der heutigen Literatur werden jedoch alternative Bezeichnungen verwendet. Position wird auch als Translation und Orientierung auch als Rotation bezeichnet. Dieser Abschnitt stellt eine Übersicht der wichtigsten Arbeiten zu diesem Thema vor.

Methoden

Eine Übersicht über die unterschiedlichen Methoden der Interaktionstechniken für Rotation und Translation diskutieren Hancock et al. (2006). Ihre Arbeit befasst sich speziell mit Methoden für Multitouch-Geräte. Dabei beschreiben Hancock et al. die Methoden formal und definieren zu diesem Zweck folgende Ein- und Ausgabeparameter für die Interaktionstechniken:

- T – bezeichnet den initialen Kontaktpunkt des Fingers auf der Multitouch-Oberfläche. Bei mehreren Punkten werden die Bezeichner dementsprechend indiziert (T_1, T_2 usw.).
- T' – bezeichnet die Position des Fingers auf der Multitouch-Oberfläche zum Zeitpunkt des Abhebens. Bei mehreren Punkten werden die Bezeichner dementsprechend indiziert (T'_1, T'_2 usw.).
- O – ist das Zentrum der Multitouch-Oberfläche.
- C – ist die Position des Objektmittelpunkts, bevor es bewegt oder rotiert wurde.
- C' – ist die Position des Objektmittelpunkts, nachdem es bewegt oder rotiert wurde.

Abbildung 3.9 illustriert diese Parameter am Beispiel der Positionierung (Translation). Tabelle 3.2 stellt die Unterschiede der einzelnen Methoden bezüglich der Ein- und Ausgabeparameter im Vergleich dar. Beispielsweise dient bei der unabhängigen Rotation der Mittelpunkt des Objekts als Pivotpunkt. Bei der automatischen (kontinuierlichen) Rotation wird um den Mittelpunkt der Multitouch-Oberfläche rotiert.

Hancock et al. (2006) stellen folgende Methoden vor:

Independent Rotation & Translation Um unabhängige Rotationen oder Translationen mit dieser Methode durchzuführen, werden unterschiedliche Bereiche des Objekts definiert, die die jeweilige Aktion auslösen. Abbildung 3.10 skizziert diese Methode schematisch. Die orangene Fläche definiert beispielsweise die Fläche, die die Rotation auslöst. Befindet sich T innerhalb dieser Fläche, so wird um C rotiert. Der Rotationswinkel wird über den Winkel

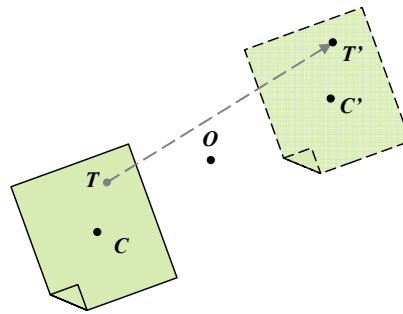


Abbildung 3.9.: Schematische Illustration von *Translation* (Hancock et al., 2006). Die Orientierung und Größe des Objekts werden nicht verändert. T ist der Aufpunkt des Fingers auf der Multitouch-Oberfläche innerhalb des Objekts. T' die Zielposition nach der Translation. C und C' bezeichnen den Mittelpunkt des Objekts vor und nach der Translation. O ist der Mittelpunkt der Multitouch-Oberfläche.

	fixierter Punkte	Pivotpunkt	Rotationswinkel
Independent (Translation)	Alle Punkte	–	–
	$C \rightarrow C'$	C	$\angle TCT'$
Independent (Rotation)	$T \rightarrow T'$	O	$\angle TOT'$
Automatic (Continuous)	$T \rightarrow T'$	O	$2\pi/n$
Automatic (Discrete)	$T \rightarrow T'$	T	$\angle TCT'$
Integral (RNT)	$T_1 \rightarrow T'_1$ oder $T_2 \rightarrow T'_2$	T_1, T_2 oder Mittelpunkt	$\angle T_2 T_1 T'_2$
2-Punkt			

Tabelle 3.2.: Vergleich der einzelnen Methoden bezüglich der dazugehörigen Ein- und Ausgabeparameter (Hancock et al., 2006). n ist die Anzahl der Referenzpunkte, an denen das Objekt ausgerichtet werden soll. Beispielsweise kann dies die Kante des Tisches sein.

beschrieben, der zwischen T, C und T' liegt. Die Translation kann über die restliche Fläche des Objekts ausgelöst werden (siehe Abbildung 3.9). Diese Technik wird beispielsweise von Cohé et al. (2011) verwendet, um Objekte sequentiell zu rotieren, zu skalieren und zu positionieren.

Automatic Orientation Bei *Automatic Orientation* werden Translation und Rotation durch eine einzige Bewegung ausgelöst. Dabei kommt es zur automatischen Rotation des Objekts durch Ausrichtung an einem vordefinierten Referenzpunkt. Dies kann beispielsweise der Benutzer selbst sein, sodass das Objekt immer dem Benutzer zugewandt ist. Abbildung 3.11 illustriert dies mit dem Zentrum der Multitouch-Oberfläche als Pivotpunkt. Nachteil dieser Methode ist, dass nicht alle Rotationen durchführbar sind. Sie eignen sich deshalb nur für

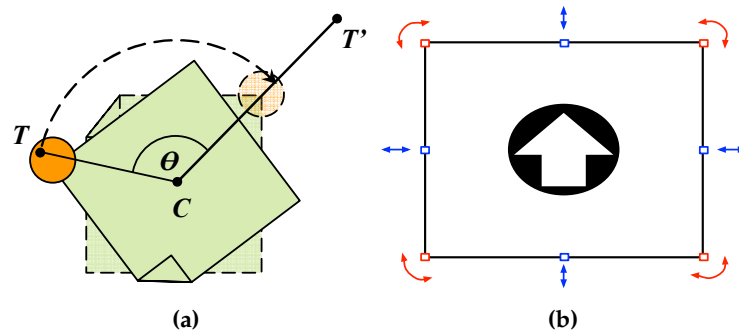


Abbildung 3.10.: Schematische Illustration von *Independent Rotation & Translation* (Hancock et al., 2006). Die orangene Fläche löst die Rotation aus (a). Der Pivotpunkt C liegt im Zentrum des Objektes. Der Winkel θ für die Rotation wird über die Punkte T , C und T' definiert. Dieses Schema wird bei aktueller Software häufig eingesetzt (b), bei der in der Regel die Eckpunkte zur Rotation (rot) und die Kanten zur unabhängigen Skalierung des Objektes (blau) verwendet werden.

eingeschränkte Szenarien, wie beim kollaborativen Arbeiten an einem Multitouch-Tisch. Dabei werden die Dokumente automatisch rotiert, sodass sie dem Betrachter zugewandt sind.

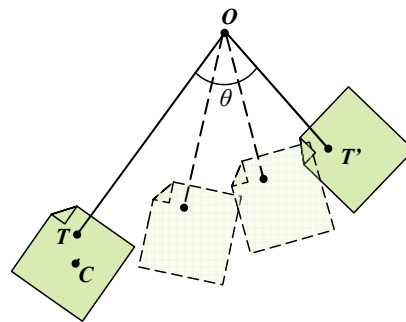


Abbildung 3.11.: Schematische Illustration von *Automatic Orientation* (Hancock et al., 2006). Das Objekt wird um einen festdefinierten Pivotpunkt O rotiert. Der zu rotierende Winkel wird über die Punkte T , T' und O berechnet (Hancock et al., 2006).

Forlines et al. (2005) haben beispielsweise drei unterschiedliche Varianten untersucht, wie Dokumente automatisch ausgerichtet werden können: *Document-Centric*, *Touch-Centric* und *Mixed-Focus* (siehe Abbildung 3.12). *Document-Centric* zentriert das Dokument unter dem Finger. Es orientiert sich an der direkten Verbindungslinie zwischen Finger und Tischmittelpunkt. *Touch-Centric* richtet das Objekt an der Verbindungslinie zwischen Finger und Tischmittelpunkt aus. Zentriert es aber nicht unter dem Finger. *Mixed-Focus* kombiniert beide Methoden, indem es die *Touch-Centric*-Methode für die Bewegung und die *Document-Centric*-Methode für die Rotation anwendet. Ihre Evaluation ergaben, dass *Document-Centric* die schnellste und die am wenigsten fehleranfällige Methode ist. Sie erhielt von den Versuchspersonen aber die niedrigste Bewertung. Alle drei Methoden sind bei kleinen Dokumenten schneller und erzielen präzisere Ergebnisse.

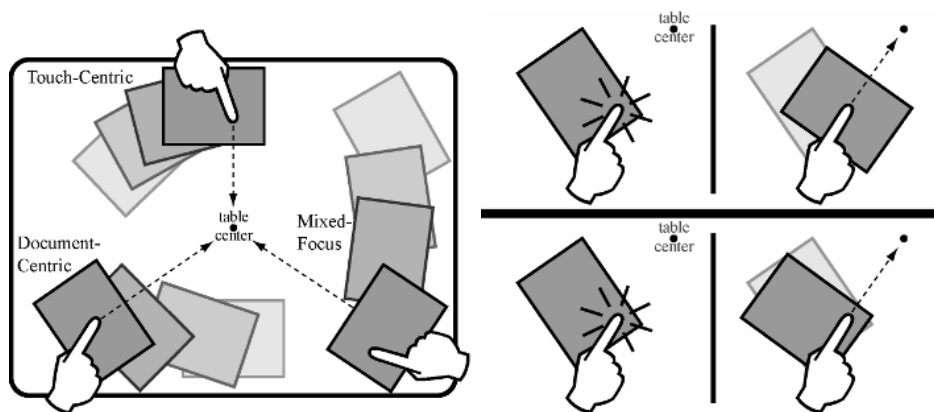


Abbildung 3.12.: Methoden zur automatischen Orientierung von Dokumenten (Forlines et al., 2005). Die Zeile rechts-oben zeigt wie *Document-Centric* das Dokument zentriert. Es orientiert sich an der direkten Verbindungslinie zwischen Finger und Tischmittelpunkt. Die Zeile rechts-unten illustriert die *Touch-Centric*-Methode. Das Objekt wird an der Verbindungslinie zwischen Finger und Tischmittelpunkt ausgerichtet aber nicht unter dem Finger zentriert (Forlines et al., 2005).

Integral Rotation & Translation Diese Technik erlaubt ebenfalls die gleichzeitige Rotation und Translation eines Objekts. Im Unterschied zu *Automatic Orientation* werden physikalische Modelle verwendet, um beide Interaktionen in eine Bewegung zu integrieren. Die Integration soll die Translation und Rotation eines echten Papierblattes simulieren, das auf einem Schreibtisch bewegt wird. Beispiele für eine solche Integration sind die Interaktionstechniken *TNT* (Liu et al., 2006) und *RNT* (Rotate N' Translate) (Beaudouin-Lafon, 2001; Kruger et al., 2005). Son und Lee (2013) stellen hingegen eine alternative Methode vor, die sowohl die gleichzeitige Translation, Rotation und Skalierung mit zwei Fingern erlaubt, als auch die Rotation und Skalierung mit nur einem Finger. Dies geschieht durch das Abschalten der Translation während der Ein-Finger-Interaktion. Hancock et al. (2007) erweitern *RNT*, sodass Objekte auch in 3D gleichzeitig rotiert und positioniert werden können. Die Funktionsweise von *RNT* wird in Abbildung 3.13a schematisch skizziert. *RNT* verwendet physikalische Modelle, um Objekte gleichzeitig zu rotieren und zu positionieren. Die Rotation wird durch die Positionierung des Objekts ausgelöst, bei dem sich das Objekt aber wie ein reales Blatt auf einem Schreibtisch verhält. Verschieben wird das Objekt demnach durch den Vektor zwischen T und T' . Der zu rotierende Winkel liegt zwischen den Punkten T , C und T' . Die Rotation erfolgt dann um den Punkt T' .

Two-Point Rotation & Translation Bei der *Two-Point Rotation* Methode werden zwei Finger verwendet, um das Objekt gleichzeitig zu verschieben und zu drehen (siehe Abbildung 3.14). Die Translation geschieht über den Vector zwischen T_1 und T'_1 . T'_1 dient gleichzeitig als Pivotpunkt für die Rotation. Der Rotationswinkel berechnet sich über die Punkte T_2 , T'_1 und T'_2 . Gleichzeitig kann das Verhältnis zwischen $|T'_1 T'_2| : |T_1 T_2|$ als Skalierungsfaktor zur gleichzeitigen Skalierung des Objekts verwendet werden.

Freiheitsgrade Entscheidend für den Einsatz der genannten Methoden ist die Anzahl der DoF, die zur Verfügung stehen (Eingabe) sowie die Anzahl der DoF, die verändert

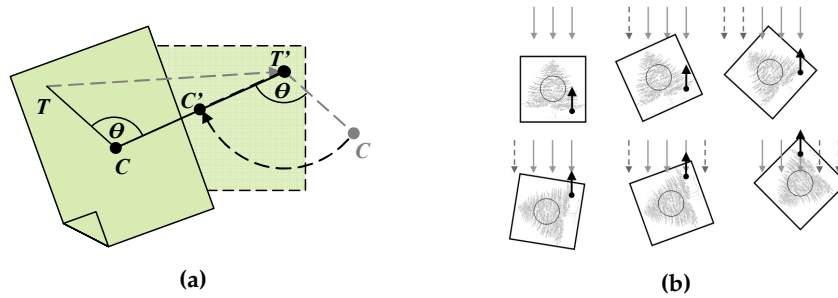


Abbildung 3.13.: Schematische Illustration von RNT (Hancock et al., 2006). RNT ermöglicht die gleichzeitige Rotation und Translation von Objekten (a). Positioniert wird das Objekt durch den Vektor zwischen T und T' . Dabei wird auch die Rotation ausgelöst. Der zu rotierende Winkel liegt zwischen den Punkten T, C und T' . Pivotpunkt ist Punkt T' . Bei der implementierten Variante von Kruger et al. (2005) dient der Kreis in der Mitte zur unabhängigen Translation des Bildes. Wird das Objekt an anderen Stellen berührt und neu positioniert, kommt es zur gleichzeitigen Rotation des Objekts.

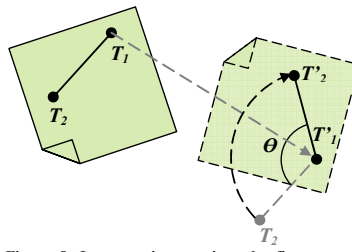


Abbildung 3.14.: Schematische Illustration von *Two-Point Rotation & Translation* (2-Punkt-RT) (Hancock et al., 2006). Der erste Aufpunkt T_1 dient sowohl als Pivotpunkt für die Rotation und als auch als Fixpunkt für die Translation. Die Rotation erfolgt über den Winkel $\angle T_2 T_1' T_2'$.

werden sollen (Ausgabe). Tabelle 3.3 fasst die benötigten DoF der vorgestellten Methoden zusammen.

	Eingabe	Ausgabe
Independent (Translation)	x und y	x und y
Independent (Rotation)	x und y	θ
Automatic (table-centric)	x und y	r und θ
Integral Rotation & Translation	x und y	x, y und θ
2-Point Rotation & Translation	x_1, y_1, x_2, y_2	x, y, θ und (Größe)

Tabelle 3.3.: Vergleich der Freiheitsgrade für Ein- und Ausgabe für jede Methode (Hancock et al., 2006). x und y beschreiben die Koordinaten der Translation. θ ist der zu rotierende Winkel. Die indizierten Variablen beschreiben mehrere Berührungspunkte auf dem Multitouch-Display.

Selektion

Bei *Selektion* (*Select*) wählt der Benutzer aus einer Menge von Elementen ein bestimmtes Element aus. Dies kann entweder ein Befehl oder ein beliebiges Objekt der grafischen Be-

nutzeroberfläche sein. Im Multitouch-Bereich wird Selektion auch als *Tapping* bezeichnet und wurde in mehreren Arbeiten bereits auf Performanz untersucht. Dabei wird mit dem Finger das gewünschte Objekt berührt. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass *Tapping* mit Multitouch eine höhere Performanz und Effizienz aufweist als die Selektion mit der Maus (Forlines et al., 2007; Kin et al., 2009; Sasangohar et al., 2009). Kin et al. (2009) konnten sogar zeigen, dass selbst unerfahrene Benutzer mit Hilfe des Multitouch doppelt so schnell sind wie mit der Maus. Ebenso berichten sie, dass die bimanuale Selektion um ca. 27 % schneller ist als die Selektion mit der einhändigen Multitouch-Technik. Mehr-Finger-Selektion waren hingegen nicht signifikant schneller als die Selektion mit der Zwei-Finger-Methode, produzierten aber signifikant mehr Fehler als die anderen Techniken (Maus, Ein-Finger, Zwei-Finger).

Eine Herausforderung der Selektion bei Multitouch-Displays ist das sogenannte „Fat-Finger“-Problem, bei dem der Finger aufgrund seiner Größe ein präzises Auswählen von Objekten erschwert (Albinsson und Zhai, 2003; Benko et al., 2006; Olwal et al., 2008; Wigdor und Wixon, 2011; Zhai und Kristensson, 2012). Ebenso kommt es durch das direkte Arbeiten auf der Bildschirmoberfläche zur Verdeckung von Objekten (*Occlusion*) (Benko et al., 2006; Cockburn et al., 2012; Forlines et al., 2007; Vogel und Casiez, 2012). Benko et al. (2006) schlagen fünf Techniken vor, um das Problem *Occlusion* und *Fat-Finger*-Problem zu lösen. Dabei wird u. a. der Mauszeiger versetzt, sodass dieser nicht mehr unter dem Finger liegt oder das Ziel wird vergrößert. Olwal et al. (2008) ersetzen die *Tapping*-Technik durch *Rubbel*-Gesten, um Objekte präziser zu selektieren. Matejka et al. (2009) lösen dieses Problem, indem sie die Maus virtuell mit Handgesten simulieren. Baudisch und Chu (2009) lagern Interaktionen auf die Rückseite von Multitouch-Geräten aus, um die Verdeckung zu umgehen. Kin et al. (2011) schlagen ein gestenbasiertes Menü bei kleinen Displays vor, das mit den beiden Daumen gesteuert werden kann. Dabei werden die Richtungen der Daumenbewegungen auf bestimmte Menüeinträge gelegt und durch die Gesten ausgewählt (siehe Abbildung 3.15).



Abbildung 3.15.: Bimanuales Gestenmenü auf einem iPod (Kin et al., 2011). Ein zweistufiges Menü wird per Gesten mit den Daumen angesteuert. Mit dem linken Daumen wird der Menüeintrag „Text Attributes“ ausgewählt. Der rechte Daumen wählt dann den Eintrag „Bold“ aus, um die Schrift *fett* zu machen.

In 3D erschwert zudem die zusätzliche Dimension das Selektieren (Benko und Feiner, 2007; Teather und Stuerzlinger, 2013). Eine Lösung stellen Benko und Feiner (2007) mit der sogenannten *Ballon-Metapher* vor. Die *Ballon-Metapher* beschreibt einen schwebenden Ballon,

der an einem Faden befestigt ist. Wird dieser Faden zwischen zwei Finger genommen, so wirkt sich die Veränderung des Abstandes zwischen diesen beiden Fingern direkt auf die Höhe des Luftballons aus. Nähern sich die Finger, so steigt der Ballon. Entfernen sich beide Finger voneinander, so sinkt der Ballon (siehe Abbildung 3.16a). Anhand dieser Metapher wurde eine Technik entwickelt, um Objekte im 3D-Raum zu selektieren. Dies geschieht durch Trennung der Selektionsaufgabe in zwei Teilaufgaben. Somit erfolgt die Selektion in 3D über eine 2D- und 1D-Positionierungsaufgabe. Abbildung 3.16b zeigt die grafische Ausgabe des Interfaces. Zur Unterstützung der 3D-Wahrnehmung wurden visuelle und auditive Signale eingesetzt. Bei Veränderung des Fadens, wurde sowohl der Ballon als auch der Faden orange, sobald der Ballon verschoben wurde, wurde er weiß. Zur Identifikation der Finger ist die Reihenfolge beim Aufsetzen der Finger entscheidend (*order based approach*). Der erste Finger definiert den Anker, den Finger am Ende des Fadens. Der zweite Finger steuert die Länge des Fadens und der dritte Finger führt die Selektion aus. Daiber et al. (2012) haben diese Metapher für Multitouch umgesetzt (siehe Abbildung 3.16c).

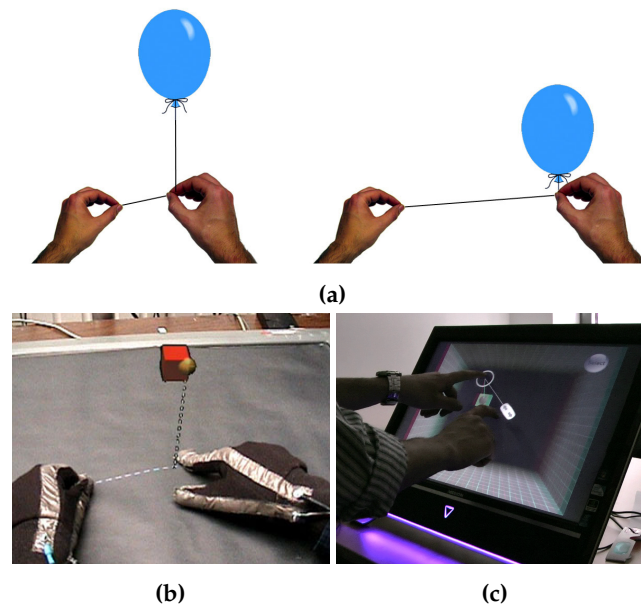


Abbildung 3.16.: Ballonmetapher (Benko und Feiner, 2007). Die Höhe eines mit Helium gefüllten Luftballon kann über den Abstand zweier Hände gesteuert werden, die einen Faden festhalten an dem der Ballon befestigt ist (a). Benko und Feiner (2007) implementierten es für die Selektion in 3D (b), Daiber et al. (2012) für die Nutzung mit Multitouch (c).

Positionierung

Positionierung (Position) verschiebt ein Objekt, indem der Benutzer einen Punkt auf dem interaktiven Display zur Platzierung des Objekts kennzeichnet. Dieser kann in 1D, 2D oder 3D sein. Diese Aufgabe wird auch als *Translationsaufgabe bzw. Translation* (Hancock et al., 2006; Stoelen und Akin, 2010) bezeichnet. Als Standardinteraktionstechnik für Translation gilt die *Dragging*-Technik (Cockburn et al., 2012). Dabei wird der Finger auf das Objekt gelegt, sodass es dem Finger folgt solange dieser die Multitouch-Oberfläche berührt. In

dieser Arbeit bezeichnet *Translation* die Positionierungsaufgabe. Als Verbform wird jedoch *positionieren* verwendet.

Bedingt durch das „Fat-Finger“-Problem ist auch bei Translation die Präzision eine Herausforderung (Bérard und Laurillau, 2009; Fernquist et al., 2011). Sie zählt aber trotzdem zu den Standardinteraktionen auf einem Multitouch (Micire et al., 2009; Wobbrock et al., 2009). Obwohl sie zu den am häufigsten genutzten Gesten auf Multitouch-Geräten zählt (Weiss et al., 2010), gibt es bisher nur wenige Untersuchungen, die die Performanz der *Dragging*-Technik untersuchen (Cockburn et al., 2012). Die wenigen existierenden Arbeiten wie von Cockburn et al. (2012), Forlines et al. (2007) und Pedersen und Hornbæk (2012) untersuchen zwar die Performanz von Translation auf Multitouch-Geräten, berücksichtigen aber nicht die Performanz in den unterschiedlichen Zonen eines Displays. Pedersen und Hornbæk (2012) taten dies für zumindest große Multitouch-Displays. Sie verglichen die Performanz von Multitouch-Interaktion (Tapping und Dragging) in vertikaler und horizontaler Neigung. Dabei war es den Versuchspersonen freigestellt, wie sie die Aufgaben lösten. Sie konnten beide Hände oder auch mehrere Finger einsetzen. Die Ergebnisse von Pedersen und Hornbæk zeigen beim Tapping eine 5 % höhere Performanz bei vertikaler Neigung. Beim Dragging hingegen ist die horizontale Neigung um 5 % schneller und es werden zusätzlich weniger Fehler produziert.

Orientierung

Bei *Orientierung* (*Orient*) wird ein Objekt im 2D-Raum oder 3D-Raum durch den Benutzer rotiert. Dazu müssen die Eingabegeräte mindestens die Anzahl der DoF anbieten, wie die angeforderte Aufgabe benötigt. Diese Aufgabe wird auch *Rotation* genannt. Dieser Begriff wird in dieser Arbeit durchgehend verwendet.

Die bekannteste und am häufigsten eingesetzte Rotationstechnik auf dem Multitouch ist die sogenannte *Two-Point Rotation & Translation*-Technik (*2-Punkt-RT*-Technik) (Hancock et al., 2006; Hoggan et al., 2013b). Aus diesem Grund wird auch in dieser Arbeit die *2-Punkt-RT*-Technik für die Rotation eingesetzt. Vorteil dieser Technik ist die gleichzeitige Translation und Rotation des Objekts auf einem Multitouch-Gerät. Im Allgemeinen muss das Eingabegerät genügend DoF anbieten, um die Rotation parallel zur Translation durchführen zu können (Hancock et al., 2009; Herrlich et al., 2011; Martinet et al., 2010; Reisman et al., 2009). Sind die DoF des Eingabegerätes beschränkt, können softwaretechnische Lösungen die parallele Translation und Rotation trotzdem ermöglichen (Beaudouin-Lafon, 2001; Hancock et al., 2007; Kruger et al., 2005; Liu et al., 2006; Son und Lee, 2013).

Durch die vielen DoF empfiehlt sich das Multitouch als Eingabegerät zur Manipulation von Objekten in 3D. Die bekanntesten Interaktionstechniken für 3D-Interaktionen sind *Screen-Space* (Reisman et al., 2009), *DS3 Depth-Separated Screen Space* (Martinet et al., 2010) oder *Shallow Depth* (Hancock et al., 2007). Diese Interaktionstechniken stellen verschiedene Ansätze vor, wie eine Rotationstechnik für den 3D-Raum umgesetzt werden kann. Hancock et al. (2009) stellen zusätzlich mit *Sticky Tools* nicht nur Interaktionstechniken für 3D vor, sondern zeigen auch Manipulationswerkzeuge, die die Interaktionstechniken konkret anwenden. Alle aufgeführten Techniken sind darauf ausgelegt sowohl Translation als auch

Rotation parallel auszuführen. Die einzige Ausnahme bilden Martinet et al. (2010). Sie wollten zeigen, dass die Trennung von Translation und Rotation für 3D-Interaktionen zu einer besseren Performanz und einer höheren Akzeptanz durch die Benutzer führt. In ihrer Studie konnten sie zeigen, dass die Trennung der Dimensionen, eine durchschnittliche Steigerung von mindestens 22 % erreicht. Die bessere Performanz durch Trennung konnten Veit et al. (2009) in ihrer Studie bestätigen.

Pfad

Bei Pfadaufgaben definiert der Nutzer über einen bestimmten Zeitraum neue Positionen und Orientierungen des Objekts. Die Fähigkeit von Interaktionstechniken diese Art von Aufgaben zu lösen, wird in der Regel Form von *Docking*- oder *Matching*-Aufgaben getestet. Dabei wird ein Objekt aus einer Ausgangsorientierung und -position in eine Zielorientierung und -position überführt. Dies geschieht sowohl in 2D (Bi et al., 2011; Leftheriotis und Chorianopoulos, 2011; Wigdor et al., 2006) als auch in 3D (Avery et al., 2014; Chen et al., 1988; Cockburn et al., 2012; Forlines et al., 2007; Hancock et al., 2007; Herrlich et al., 2011; Sturman, 1992; Veit et al., 2009; Zhai und Milgram, 1998). Ziel dieser Arbeiten war in den meisten Fällen der Vergleich zweier Interaktionstechniken oder Eingabegeräte. Verglichen wurde dabei die Performanz oder die Effizienz anhand von konkreten *Docking*- bzw. *Matching*-Aufgaben in 2D oder 3D. Abbildung 3.17 zeigt zwei Beispiele solcher konkreten Aufgaben. Kruger et al. (2005) verwenden eine *Matching*-Aufgabe in 2D, bei der ein Objekt in ein anderes Objekt überführt werden soll (siehe Abbildung 3.17a). Bei Hancock et al. (2007) müssen die Probanden verschiedene Objekte aneinander andocken (Abbildung 3.17b).

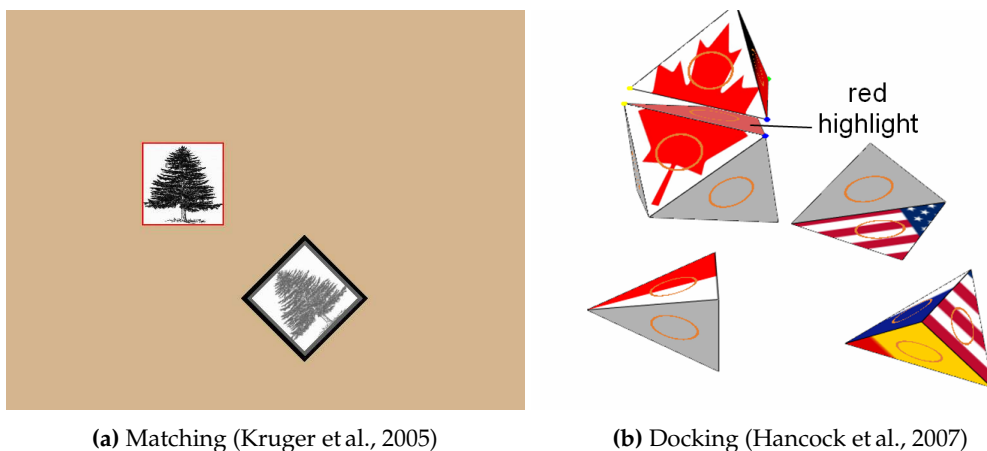


Abbildung 3.17: *Matching*- und *Docking*-Aufgabe. Bei *Matching* muss das rot umrandete Objekt passgenau auf das Zielobjekt gelegt werden (a). Bei *Docking* müssen die roten Flächen aneinander gelegt werden (b).

Quantifizierung und Texteingabe

Bei Multitouch-Geräten werden *Quantifizierung* (*Quantify*) bzw. *Texteingaben* (*Text*) standardmäßig über eine virtuelle Tastatur (Soft-Keyboard) ausgeführt. Dabei können die Zeichenfol-

gen durch Berühren der entsprechenden Tasten *getippt* oder durch Gesten erzeugt werden (Isokoski et al., 2010; Rick, 2010; Zhai und Kristensson, 2012). Den Vorteil das Tastaturlayout dynamisch verändern zu können, nutzen MacKenzie und Zhang (1999), Rick (2010) und Zhai et al. (2000) aus, um performantere Layouts zu entwickeln.

Isokoski (2004) setzt hingegen auf ein neues Konzept, um die Eingabe per Soft-Keyboard zu beschleunigen. Sie führen sogenannte *Marking Menus* ein. Diese erscheinen nachdem ein Buchstabe ausgewählt wurde und zeigen Buchstaben an, die in diesem Zusammenhang am häufigsten verwendet werden. Dadurch konnten die Autoren eine um 11 %–37 % schnellere Eingabezeit messen als ohne *Marking Menus*.

Arif et al. (2014) konnten zeigen, dass gestenunterstützende Tastaturen bis zu 16 % schneller sind als eine normale Tastatur. Dabei konnten Benutzer bestimmte Gesten einsetzen, um häufig verwendete Aktionen auszulösen. Beispielsweise steht ein Streichen des Fingers nach rechts für ein Leerzeichen; ein Streichen nach links löscht das vorherige Zeichen (Backspace). Befragungen der Testnutzer zeigten ebenfalls eine hohe Akzeptanz. 90 % der Testnutzer wünschten sich dieses Design als Standardtastatur.

Kim et al. (2013) wählten ein neues Paradigma bei Soft-Keyboards, um Buchstaben zu tippen. Standard-Soft-Keyboards reagieren, sobald der Finger die Oberfläche berührt. Der Buchstabe unter dem Berührungspunkt des Fingers wird dann ausgewählt. Kim et al. wählen hingegen einen Buchstaben aus, wenn auf den Buchstaben *getippt* wurde, d. h. der Finger die Oberfläche sofort wieder verlässt. Dies entspricht auch dem Tippen auf einer normalen Tastatur. Dadurch ist es auch möglich, die Finger auf den Tasten ruhen zu lassen. Somit können die Benutzer gleichzeitig Gesten auf der Tastatur ausführen und tippen, da das Berühren der virtuellen Tasten keine Buchstaben auslöst.

Das Problem aller virtuellen Soft-Keyboards ist das fehlende haptische Feedback. Dadurch ist es ein blindes Arbeiten mit Multitouch schwierig. Daher schlagen Weiss et al. (2009), sogenannte SLAP Widgets (*Silicone iLLuminated Active Peripherals*) als zusätzliche Arbeitswerkzeuge vor. SLAP Widgets sind physische Objekte, die auf die Multitouch-Oberfläche gelegt werden können und vom System erkannt werden. Dadurch sind unterschiedliche Interaktion über verschiedenen Widgets möglich. Weiss et al. stellen in ihrer Arbeit z. B. eine Tastatur, Schieberegler und Drehknöpfe vor, die virtuelle Pendants ersetzen (siehe Abbildung 3.18a). Mit den realen Objekten ist ein genaueres und ein blindes Arbeiten möglich (siehe Abbildung 3.18b). Solche Systeme sind auch als *Tangible User Interfaces* bekannt, deren zentrale Idee die Verschmelzung von virtueller und realer Welt ist (Ishii und Ullmer, 1997). Dies geschieht, indem Objekte in der realen Welt Objekte in der virtuellen Welt repräsentieren und auch verändern können.

3.2.2. Interaktionstechniken

Dieser Abschnitt stellt Arbeiten und Studien spezieller Interaktionstechniken vor. Dabei wurden spezielle Faktoren untersucht, die einen Einfluss auf die Interaktion haben können. Beispielsweise wurde die Anordnung von Interface-Elementen (z. B. Menüs), Multitouch-Eigenschaften (z. B. Neigung des Displays, verschiedene Bereiche und Zonen des Dis-

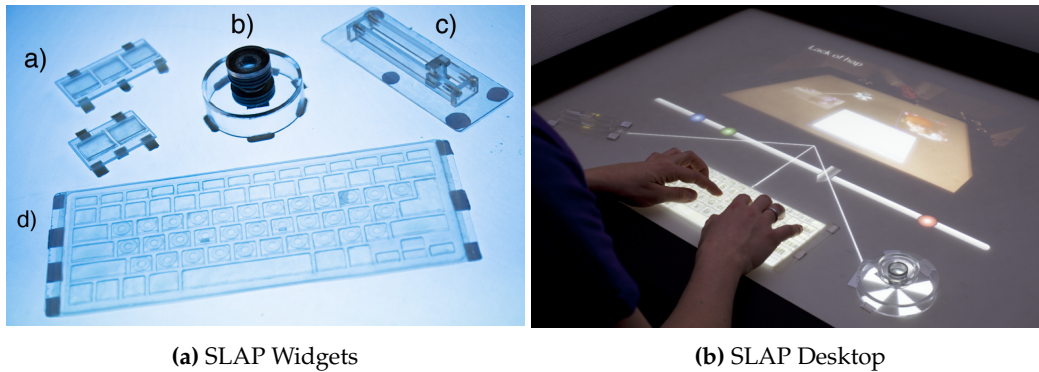


Abbildung 3.18.: SLAP (Silicone iLluminated Active Peripherals) Widgets (Weiss et al., 2009). Keypads mit zwei und drei Buttons (a), Drehregler (b), Schieberegler (c) und eine Tastatur (d). Multitouch-Arbeitsumgebungen mit SLAP Widgets erlauben durch haptisches Feedback *blindes* Arbeiten (b).

plays), Ergonomie (Erreichbarkeit, Komfort usw.) sowie Eingabemodalitäten (Finger, Maus usw.) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen mündeten in konkrete Guideline-Empfehlungen.

Kin et al. (2009) Kin et al. untersuchten die Performanz bei der Selektion von Objekten auf einem Multitouch-Display per Hand und Maus. Aus den Ergebnissen leiteten sie ab, dass die Selektion mit dem Finger deutlich schneller ist als mit der Maus. Ebenso empfehlen sie die Erkennung von zwei Fingern, da dies die Performanz erhöht. Mehr-Finger-Erkennung zur Selektion führt zu keinem Vorteil, da die Performanz nicht stieg, die Fehlerrate aber deutlich zunahm. Auch raten sie von der Nutzung mehrerer Finger einer Hand bei der Selektion von unabhängigen Zielen ab.

Banovic et al. (2011) Banovic et al. untersuchten die optimale Anordnung von Kontextmenüs auf einer Kreisfläche. Durch die Nutzung von Mehr-Fingern war die Performanz deutlich höher als bei der Nutzung mit einem Finger. Aus ihren Untersuchungen konnten sie u. a. schlussfolgern, dass der parallel Einsatz von mehreren Fingern schneller, aber auch fehleranfälliger ist. Ebenso konnten sie keinen Unterschied in der Performanz zwischen Daumen und Zeigefinger feststellen.

Wu et al. (2006) Wu et al. stellen drei Design-Prinzipien vor, mit denen ihrer Meinung nach die Entwicklung von Interaktionstechniken und Gesten systematisch und erweiterbar erfolgt:

1. *Gesture registration*: Dieses Prinzip beschreibt den Beginn jeder Geste und kann kombiniert oder einfach, kontinuierlich oder diskret sein. Sie wird eingeleitet durch eine unterscheidbare Pose und definiert damit den Kontext der weiteren Phasen. Durch die eindeutige Markierung des Kontextes, können Gesten wiederverwendet werden und reduzieren somit das Gestenrepertoire. Beispielsweise kann die Funktionalität eines Stiftes in Zusammenarbeit mit der Multitouch-Oberfläche über die *Gesture registration* vom Pointer zum Schreibgerät gewechselt werden.

2. *Gesture relaxation*: Dieses Prinzip soll verhindern, dass die Nutzer eine Geste oder Pose durchgehend beibehalten müssen. Somit soll einer schnellen Ermüdung vorgebeugt werden. Dies ist möglich, da der Kontext und die Geste nach der Registrierung bekannt sind.
3. *Gesture and tool reuse*: Dieses Prinzip gibt vor, Gesten samt Handformen, Fingerberührungen und Werkzeugen wie Stylus nach Möglichkeit wiederzuverwenden. Ermöglicht wird dies durch das Setzen des Kontextes über die *Gesture registration*. Die Wiederverwendung von Gesten und Werkzeugen erhöht die Erlernbarkeit eines Systems.

Annett und Bischof (2013) Annett und Bischof schlagen vor, Gesten zu verwenden, die von beiden Händen ausgeführt werden können. In ihren Studien konnten sie nachweisen, dass das Training einer Hand auch Einfluss auf die nicht trainierte Hand hat. In ihren Versuchen zeigten beide Hände die gleiche Performanz bei der Durchführung von Gesten, obwohl nur eine der beiden Hände trainiert wurde. Sie schlagen deshalb vor symmetrische Gesten zu verwenden, sodass sie von beiden Händen ohne Nachteile durchgeführt werden können. Dadurch können die Benutzer die Hände während der Arbeit wechseln und somit die Ermüdung und Verletzung reduzieren. Ebenso erhöht die Wiederverwendung von Gesten die Erlernbarkeit von Systemen.

Hancock et al. (2007) Hancock et al. untersuchten unterschiedliche Interaktionstechniken zur Translation und Rotation von Objekten in 3D. Die Interaktionstechniken unterschieden sich in der Anzahl der eingesetzten DoF und Finger. Durch ihre Studie konnten sie zeigen, dass die Verwendung von mehreren Fingern zur parallelen Veränderung von mehreren DoF führt. Zudem waren die Interaktionen flexibler und natürlicher. Auch zeigte sich, dass die Nutzer in der Lage sind, diese DoF zu steuern und dies auch präferierten.

Hancock und Booth (2004) Hancock und Booth verglichen verschiedene Zonen eines Touch-Display für die Eingabe mit einem Stift (siehe Abbildung 3.19). Dabei ging es hauptsächlich darum, wie Menüelemente platziert werden sollten, damit sie optimal und effizient erreicht werden können. Unter anderem variierten sie dazu auch die Neigung des Display zwischen vertikaler und horizontaler Ausrichtung. Zusätzlich unterschieden sie zwischen Links- und Rechtshändern. Die Ergebnisse zeigten, dass die performantesten Positionen sich bei Rechts- und Linkshändern spiegeln. Die Nutzerbefragungen deckten sich mit den objektiven Messungen und zeigten ebenfalls ein gespiegeltes Bild der Präferenzen zwischen Links- und Rechtshändern. So verläuft die schnellste Bewegungsachse für Linkshänder von links-oben nach rechts-unten. Bei Rechtshändern von rechts-oben nach links-unten. Aus diesem Grund schlagen die Autoren eine Erkennung der Händigkeit des Benutzers vor, um die Menüauswahl zu optimieren.

Hoggan et al. (2013b) Hoggan et al. untersuchten neben der Ergonomie auch die Performanz von *2-Punkt-RT*-Techniken für Rotationen in verschiedenen Ausführungspositionen. Dazu wurden auf einem Raster Rotationsaufgaben mit unterschiedlichen Winkeln und Fingerabständen (Diameter) durchgeführt (siehe Abbildung 3.20a und Abbildung 3.20b). In

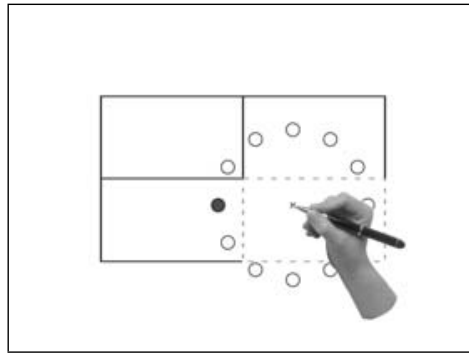


Abbildung 3.19.: Unterteilung eines Touch-Display in vier Zonen zur Untersuchung der Effizienz von Menüs in Abhängigkeit der Händigkeit (Hancock und Booth, 2004).

einer Folgestudie wurde auch unter demselben Setup die Performanz und Ergonomie der *Pinch-Geste* untersucht Hoggan et al. (2013a) (siehe Abbildung 3.20c).

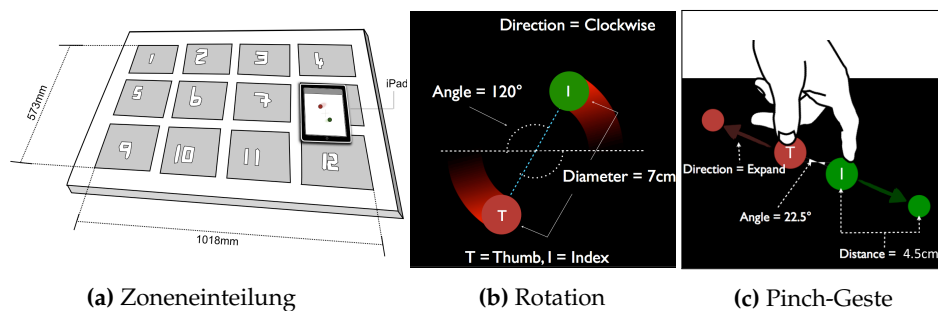


Abbildung 3.20.: Einteilung der Zonen zur Untersuchung von Rotation und Pinch-Geste (Hoggan et al., 2013a,b). Das iPad wurde in einem 3×4 Raster platziert (a). Innerhalb dieser Zonen wurden Rotationsgesten (b) und die Pinch-Geste auf Effizienz und Ergonomie untersucht (c).

Für Rotationsgesten schlussfolgern Hoggan et al. aus den Ergebnissen, dass die Abstände zwischen Zeigefinger und Daumen nicht weiter als 7 cm betragen sollten, da diese langsam sind und zu deutlich mehr Fehlern führen. Bei einem Winkel von 120° sind Rotationen im Uhrzeigersinn noch leicht auszuführen, aber die Bewegung gegen den Uhrzeigersinn sind für die Nutzer deutlich schwerer. 48 % dieser Bewegungen mussten sogar abgebrochen werden. Im Allgemeinen benötigen Rotationen im Uhrzeigersinn länger und sind fehleranfälliger.

Für *Pinch*-Gesten geben die Autoren an, dass der Abstand zwischen den Fingern eine Auswirkung auf die Ausführungszeiten und Fehlerrate hat. Je weiter der Abstand, desto länger dauern sie. Zudem steigt gleichzeitig die Fehlerrate der ergonomisch bedingten Fehler, d. h. Kontaktverlust oder eine nicht Durchführbarkeit der Konfiguration. Zusätzlich empfehlen sie *Pinch*-Gesten, bei denen die Finger zusammengeführt werden, da diese schneller und ergonomischer sind als Gesten, bei denen die Finger auseinandergehen. Zusätzlich sollten *Pinch*-Gesten in der Nähe des Körpers auf der kontralateralen Seite

vermieden werden. Hingegen sind Gesten auf der ipsilateralen Seite nahe am Körper schneller.

Wobbrock et al. (2009) Wobbrock et al. ließen Nutzer Gesten „designen“, um zu untersuchen welche Gesten sie intuitiv verwenden würden, um Objekte auf bestimmte Art zu manipulieren (vergrößern, rotieren usw.). Dazu wurden den Versuchspersonen Aufgaben vorgesprochen und gefragt, wie sie diese Aufgabe an dem gezeigten Objekt lösen würden. Beispielsweise wurden sie gebeten ein Objekt zu vergrößern. Anschließend sollten sie zeigen, mit welcher Geste sie dies durchführen würden. Abbildung 3.21 zeigt Beispielaufgaben und Gesten der Versuchspersonen. Die Ergebnisse ergaben, dass nur 60.9 % der Gesten, die die Autoren definierten, von den Versuchspersonen auch verwendet wurden. Die restlichen Gesten wurden von den Versuchspersonen nie durchgeführt. Auch achteten die Nutzer weder auf die Hand, noch auf die Anzahl der Finger, die sie einsetzten. Daher raten Wobbrock et al. bei der Erstellung von Interaktionstechniken und Gesten, Endnutzer einzubeziehen.

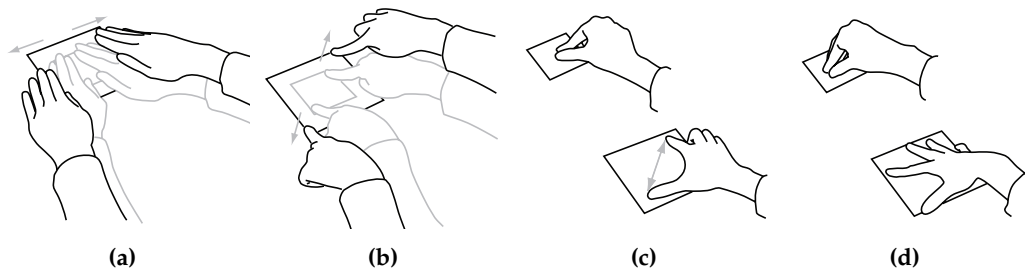


Abbildung 3.21.: Beispiele für selbstdefinierte Gesten von Versuchspersonen (Wobbrock et al., 2009). Die Versuchspersonen definierten unterschiedliche Gesten zur Vergrößerung eines Objektes: (a) auseinanderschieben von flachaufliegenden Händen, (b) auseinanderbewegen von zwei Händen mit Fixierung des Objekts durch zwei Finger, (c) Pinch-Geste und (d) spreizen der Finger einer Hand auf dem Objekt.

Wang et al. (1998) Wang et al. untersuchten die Bewegungsabläufe bei Translations- und Rotationsaufgaben. Dazu mussten die Versuchspersonen einen Holzwürfel von einer Startkonfiguration in eine Zielkonfiguration überführen. Dies erzwang Translation und Rotation des Holzwürfels. Die Zielkonfiguration wurde über ein virtuelles Drahtgittermodell angezeigt. Die Versuchspersonen sahen dieses Modell über eine Brille, die die stereoskopischen Bilder des Modells als 3D-Bild zusammenfügte. Über einen halbdurchsichtigen Spiegel konnte der Blick auf den realen Würfel und die Hände verdeckt werden, sodass die Versuchspersonen die Objekte nur noch über die Brille virtuell wahrnahmen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.22 zu sehen. Die Autoren untersuchten die Strategien, mit denen die Versuchspersonen die Aufgaben lösten. Sie stellten die Hypothese auf, dass Translation und Rotation parallel ausgeführt werden und der visuelle Faktor Einfluss auf die Strategien hat.

Die Ergebnisse zeigten, dass Benutzer die Interaktionen parallel ausführen, was dafür spricht, dass dies die natürlichere Interaktionsform ist. Die Autoren beobachteten eine parallele Ausführung beider Interaktionen über die Zeit hinweg, trotz eines versetzten Starts von Translation und Rotation. In den meisten Fällen wurde die Rotationsbewegung vor der Translationsbewegung beendet. So konnten sie folgende allgemeine Strategie beobachten:

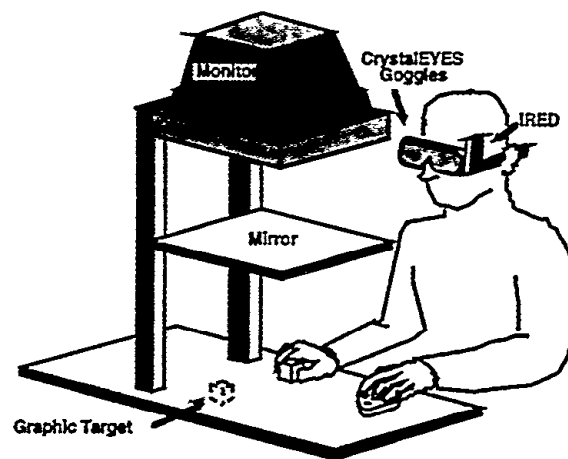


Abbildung 3.22.: Versuchsaufbau (Wang et al., 1998). Beim Versuch nahmen die Versuchspersonen die Umgebung über eine Brille wahr. Ziel war es einen realen Holzwürfel über Rotationen und Translation in die Zielkonfiguration zu überführen. Diese wurde als Drahtgittermodell des Würfels mit der Brille dargestellt. Ein halbdurchlässiger Spiegel diente dazu, die Sicht auf die Hände zu ermöglichen oder zu verhindern (Wang et al., 1998).

Die Interaktion startet zuerst mit der Translation. Nach durchschnittlich 30 ms beginnt die Rotation. Diese ist im Allgemeinen vor der Translation fertig. Damit beendet die Translation meist die Gesamtbewegung. Zudem stellten sie fest, dass die Rotationsphase länger dauert, je länger die Distanz der Translation oder je größer der zu rotierende Winkel ist. Ebenso starten die Versuchspersonen die Rotation früher, wenn sie absehen können, dass die Rotation länger dauert. Unerwarteterweise zeigte sich kein Unterschied, ob die Versuchspersonen die Hände und den realen Würfel sahen oder nicht. Die Autoren vermuteten daher, dass die Strategien schon feststehen, sobald die Versuchspersonen die Start- und Zielkonfiguration sehen.

Aufbauend auf den Ergebnissen raten sie daher, Interaktionstechniken so zu entwerfen, dass eine parallele Ausführung möglich ist. Dadurch wird die Interaktion schneller. Zusätzlich merken sie an, dass die Translation der kritische Teil der Interaktion ist, weil sie einen größeren Einfluss auf die gesamte Ausführungszeit hat.

Olafsdottir et al. (2014) Olafsdottir et al. untersuchten die Planung von Interaktionen. Es wurde untersucht, ob Nutzer das Greifen von Objekten im Voraus planen, wenn sie sowohl den Start- als auch den Endzustand der Interaktion vor der Ausführung kennen. Zusätzlich wurde die Reaktionszeit gemessen, die sie als Indikator für die Schwierigkeit einer Aufgabe interpretieren: Je länger die Planungszeit, desto schwieriger die Interaktion. Diese Reaktionszeit definieren sie als Planungszeit. Gemessen wurde sie als Zeitspanne von der Präsentation der Aufgabe bis zum Zeitpunkt, wenn die Multitouch-Oberfläche berührt wurde, um die Aufgabe zu lösen. In ihrer Arbeit untersuchten sie Translation, Rotation und Rotation mit Translation (RT) von Objekten (siehe Abbildung 3.23). Die Autoren gingen davon aus, dass die Versuchspersonen die Greifposition der Finger vorplanen, um unangenehme Haltungen der Hand im Endzustand der Interaktion zu vermeiden. Dazu wurden den Teilnehmern die

Endkonfiguration der Interaktion entweder vor der Interaktion angezeigt (*Known Target*) oder erst nachdem die Interaktion angefangen hat (*Hidden Target*). *Hidden Target* diente als Kontrollbedingung, sodass die Versuchspersonen das Greifen nicht vorplanen konnten.

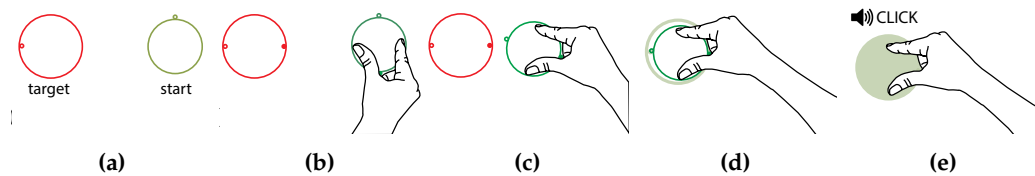


Abbildung 3.23.: Ablauf eines Trials (Olafsdottir et al., 2014). Zu Beginn wird die Start- und Zielkonfiguration eingeblendet (a). Dann kann das Objekt *gegriffen* werden (b) und anschließend gleichzeitig bewegt und rotiert werden (c). Wenn beide Markierungen übereinander liegen, wird das Zielobjekt grün (d). Um den Trial zu beenden muss der Zustand mindestens 6 s gehalten werden (e).

Die Ergebnisse zeigten, dass bei Translation kein Unterschied in der Reaktionszeit zwischen *Known Target* und *Hidden Target* festzustellen ist. Die Versuchspersonen wählen den Griff aber so, dass der *Flow* der Bewegung dadurch optimiert wird. Rotationen, bei denen die Drehung im Uhrzeigersinn verlief, haben längere Reaktionszeiten. Ebenso verlängert sich die Reaktionszeit bei größeren Winkeln. Dies gilt gleichermaßen für die RT. Zudem lassen sich unterschiedliche Planungsstrategien für gleiche Aufgaben beobachten. Außerdem sind links-gerichtete Bewegungen und Rotationen gegen den Uhrzeigersinn am schwierigsten für die Versuchspersonen. Dies bestätigt die Ergebnisse von Hoggan et al. (2013b), die ebenfalls feststellen konnten, dass für reine Rotationsaufgaben Rotationen gegen den Uhrzeigersinn am langsamsten sind. Sie empfehlen visuelle Methoden zur Unterstützung der Nutzer bei schwierigen Konfigurationen.

3.2.3. Interaktionskontext

Die folgenden Arbeiten beschäftigten sich mit der Integration von Multitouch in die alltägliche Arbeitsumgebung. Dies geschieht entweder durch direkte Einbindung in die Arbeitsumgebung oder durch Einführung neuer Paradigmen, wie zum Beispiel die Integration von vertikalen und horizontalen Multitouch-Flächen zu einer vereinten Arbeitsfläche oder von physischen Objekten zur Manipulation von virtuellen Objekten.

Rogers und Lindley (2004) Rogers und Lindley untersuchten den Einsatz von interaktiven Displays, im kollaborativem Kontext. Dabei konzentrierten sie sich hauptsächlich auf das Verhalten der Nutzer bei den verschiedenen Neigungen. Beispielsweise beobachteten sie bei der horizontalen Neigung, dass die Teilnehmer ihre Ideen mehr erklärten und zudem mehr darauf geachtet wurde, was die anderen Beteiligten tun. Bei der vertikalen Neigung empfanden die Gruppen die Gruppenarbeit als deutlich schwieriger.

Morris et al. (2008) Morris et al. führten Feldstudien durch, um die Verwendung eines Multitouch-Displays im Alltag zu beobachten. Dabei mussten die Versuchspersonen das zusätzliche Multitouch-Display jeweils in vertikaler und horizontaler Neigung in ihren Ar-

beitsplatz integrieren. Ziel dieser Studie war es, Richtlinien zur Integration von Multitouch-Displays in bestehende Arbeitsumgebungen zu erstellen. Beispielsweise empfehlen sie, dass es möglich sein muss, Multitouch-Display individuell zu neigen. In ihren Studien nutzen alle Versuchspersonen diese Möglichkeit, um den Blickwinkel zu verbessern und das Display an den persönlichen Komfort anzupassen.

Matejka et al. (2009) Matejka et al. schlagen Techniken vor, wie Multi-Finger-Eingaben die Maus effizient emulieren können. Dadurch ist ein nahtloses Arbeiten an Multitouch-Displays möglich, ohne ständig zwischen realer Maus und Tastatur wechseln zu müssen. Als problematisch stellte sich jedoch die Erlernbarkeit der vorgestellten Finger- und Handposen dar. Dadurch kam es zu einer hohen Fehlerrate bei der Nutzung. Abbildung 3.24 illustriert die Fingerposen für die Maustasten und Gesten für das Mausexplorerad.

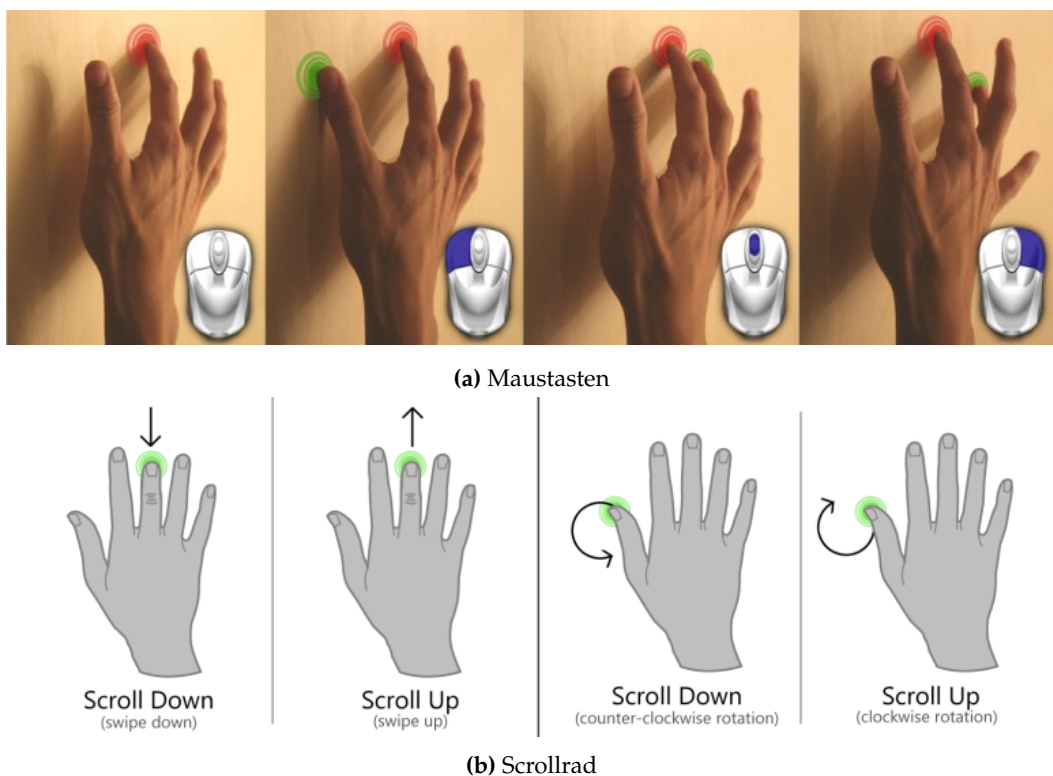


Abbildung 3.24.: Handposen zur Emulierung einer Maus auf einem Multitouch-Display Matejka et al., 2009. Unterschiedliche Handposen emulieren eine Maus und bilden die Funktionalität der Maus ab (a). Über Handgesten wird das Scrollrad der Maus emuliert (b).

Wimmer et al. (2010) Wimmer et al. entwarfen eine Arbeitsfläche, die neben der vertikalen und horizontalen Arbeitsfläche auch die gekrümmte Fläche zwischen den beiden Neigungen nutzbar machte. Die Autoren konzentrierten sich in ihrer Arbeit auf konzeptuelle Aspekte, nach denen ein solcher Arbeitsplatz entworfen werden soll. Dabei untersuchten sie u. a. neben den technischen Aspekten auch ergonomische Gesichtspunkte, die beim Bau eines solchen Display zu berücksichtigen sind. Zum Beispiel ermittelten sie, dass die optimale

Neigung des vertikalen Display 15° ist. Anhand ihrer entworfenen Guidelines wurde *Curve* als Prototyp gebaut (siehe Abbildung 3.25).



Abbildung 3.25.: Prototyp *Curve* (Wimmer et al., 2010). *Curve* wurde nach den ermittelten Kriterien umgesetzt. Es verbindet ein vertikal und horizontal geneigtes Multitouch-Display über eine gekrümmte Fläche zu einer Arbeitseinheit.

Weiss et al. (2010) Weiss et al. konstruierten mit *BendDesk* eine hybride Arbeitsfläche, die eine vertikale und horizontale Multitouch-Fläche zu einer Arbeitsfläche vereint (siehe Abbildung 3.26). Die gebogene Fläche zwischen vertikaler und horizontaler Multitouch-Fläche nannten sie *Curve* und war ebenfalls benutzbar. Ziel dieser Arbeit war es die drei Flächen in ihrer Performanz zu untersuchen.



Abbildung 3.26.: *BendDesk* Weiss et al. (2010). Bei *BendDesk* war auch die Fläche zwischen der horizontalen und vertikalen Multitouch-Fläche nutzbar.

Dazu wurden Aufgaben definiert, die sowohl innerhalb der jeweiligen Arbeitsflächen stattfanden als auch über die einzelnen Arbeitsflächen hinweg. Die Arbeitsflächen selbst wurden in sieben Zonen unterteilt. Abbildung 3.27a zeigt die sieben Zonen für jede Arbeitsfläche. Innerhalb der Flächen wurden nur vertikale Bewegungen getestet. Abbildung 3.27b illustriert die Bewegungen über die Arbeitszonen hinweg.

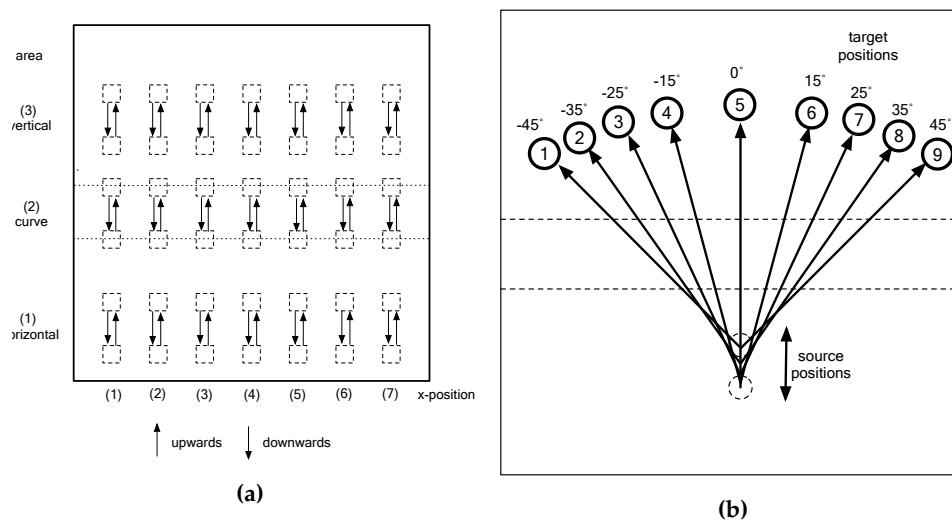


Abbildung 3.27: Versuchsbedingungen (Weiss et al., 2010). Die Arbeitsflächen wurden in sieben Zonen eingeteilt (a). Auch Bewegungen die über alle drei Arbeitsflächen in verschiedene Richtungen gehen wurden untersucht (b).

Die Ergebnisse zeigten, dass die Bewegungen innerhalb der planen Ebenen schneller sind als Bewegungen innerhalb der gekrümmten Fläche. Beim Vergleich zwischen horizontaler und vertikaler Multitouch-Fläche, können sie keinen signifikanten Unterschied in der Effizienz feststellen. In der Bewegungsrichtung liegen keine Signifikanzen vor, jedoch eine Tendenz für schnellere Aufwärtsbewegungen. Die Länge der Bewegungspfade zeigen Signifikanzen. Auf der horizontalen Multitouch-Fläche sind die Pfade signifikant kürzer als auf der vertikalen und der gekrümmten Multitouch-Fläche. Beim Vergleich der Effizienz der unterschiedlichen Bewegungsrichtung konnten sie zwischen den Neigungen (vertikal, horizontal) keinen Unterschied feststellen. In der zweiten Versuchsreihe konnten signifikante Unterschiede zwischen den Winkeln gemessen werden. Aufgrund der zu kleinen Unterschiede zwischen den einzelnen Winkeln, konnte jedoch nicht identifiziert werden, welche Kombination der Winkel sich signifikant voneinander unterschieden.

Bi et al. (2011) Die Arbeit von Bi et al. untersuchte die optimale Integration des Multitouch in eine Computerarbeitsplatzumgebung. Dazu wurde das Multitouch-Display um die Tastatur herum platziert und die Performanz des Multitouch-Display gemessen. Um ein genaueres Bild der Performanz zu erhalten, wurden die Performanz der verschiedenen Aufgaben in unterschiedlichen Zonen des Multitouch-Display gemessen. Die untersuchten Interaktionen waren eine *Dragging*-Geste und zwei *Docking*-Aufgaben mit integrierter Translation, Rotation und Skalierung. Die *Docking*-Aufgaben wurden jeweils uni- und bimanual durchgeführt. Die Analyse der Performanz erfolgte immer in Relation zur Platzierung der Tastatur. Abbildung 3.28 zeigt die Einteilung sowie die verschiedenen Platzierungen des Multitouch-Display um die Tastatur herum. Die Ergebnisse zeigten, dass die Zonen, die näher an der Tastatur liegen, die effizientesten Zonen waren. Ebenso zeigte sich, dass die vertikale Neigung des Multitouch-Display aufgrund der schlechteren Ergonomie und geringeren Performanz für die Integration am wenigsten geeignete war.

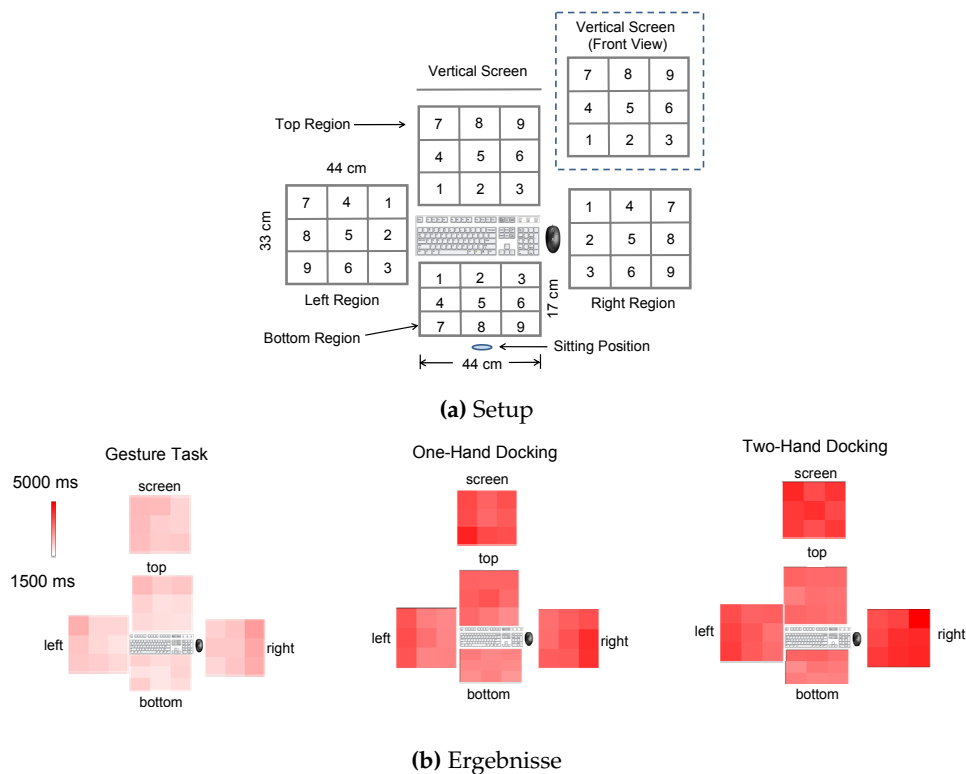


Abbildung 3.28.: Versuchsaufbau und Ergebnisse (Bi et al., 2011). Das Multitouch-Display wurde um die Tastatur herum platziert (a). Die Zonen in der Nähe der Tastatur zeigen die höchste Performanz auf (b).

Watson et al. (2013) Watson et al. untersuchten den Unterschied zwischen vertikal und horizontal geneigtem Multitouch-Display bezüglich Performanz und Benutzererfahrung bzw. -präferenz. Als Eingabeform untersuchten sie Maus- und Multitouch-Eingaben. Als Anwendung wurde ein Spiel entwickelt, bei dem die Benutzer durch Antippen von bestimmten Tieren Punkte sammelten. Um die Tiere zu sehen, mussten sie durch Zoomen bestimmte Ausschnitte vergrößern. Dies geschah durch die *Pinch-to-Zoom*-Geste. Abbildung 3.29a zeigt die gesamte Spielszene, während Abbildung 3.29b einen vergrößerten Ausschnitt zeigt.

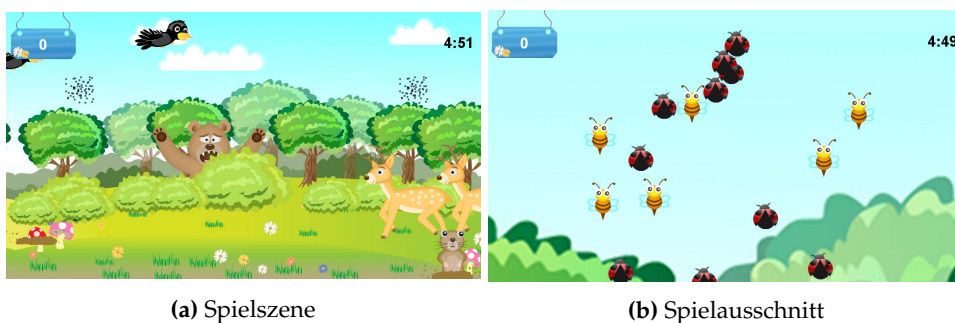


Abbildung 3.29.: Screenshots vom Spiel der Evaluation (Watson et al., 2013). Ziel des Spiels war es, die Insekten durch auswählen „abzuschießen“. Zuvor mussten die Insekten innerhalb der Spielszene gefunden werden (a), indem bestimmte Spieldausschnitte vergrößert werden (b).

Die Ergebnisse zeigten eine deutlich bessere Performanz bei Multitouch-Display als bei Maus. Als Maß für die Performanz wurde die erzielte Punktzahl verwendet. Um einen fairen Vergleich zu haben, war bei Multitouch-Display die Verwendung von mehreren Fingern nicht möglich. Subjektiv wurde die Touch-Eingabe als unterhaltsamer und angenehmer empfunden. Bezüglich der Neigung konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Weder bei der Eingabe noch in der Präferenz. Beim Vergleich der Arbeitsbelastung zwischen vertikaler und horizontaler Bedienung des Multitouch-Display, konnte eine höhere Arbeitsbelastung bei der vertikalen Bedienung festgestellt werden.

3.2.4. Fazit

Die Untersuchungen dieser Arbeit beruhen auf den Standardinteraktionstechniken für Rotation (*2-Punkt-RT*) und Translation (*Dragging*) sowie Skalierung (*Pinch*). Die Studien von der Interaktionstechniken waren Grundlage für die ersten Designentscheidungen des Interface für das Animationssystem (Kapitel 4). Beispielsweise wurde aufbauend auf den Ergebnissen von Kin et al. und Banovic et al. auf Mehr-Finger gesetzt. Aufgrund der Ergebnisse von Annett und Bischof und Wu et al. (2006) wurde eine symmetrische Steuerung implementiert, bei der beide Arme, ähnliche Bewegungen durchführen. Ebenso wurde die Möglichkeit gegeben mehrere Freiheitsgrade zu steuern (Hancock et al., 2007). Hancock und Booth und Hoggan et al. untersuchen Interaktionstechniken in mehreren Zonen, aber nur für die Eingabe mit Stift und für Rotationen. Diese Arbeit erweitert dies und untersucht die Performanz von Translation in unterschiedlichen Zonen (Kapitel 7). Das Konzept der Planungszeit von Olafsdottir et al. wurde aufgegriffen, um die Schwierigkeit von kombinierten Rotations- und Translationsbewegungen zu untersuchen (Kapitel 6). Angelehnt an Wang et al. wurden Strategien untersucht, wie Multitouch-Nutzer bestimmte Aufgaben lösen.

3.3. Koordinationsmaß

Um die Koordination von unterschiedlichen Interaktionstechniken objektiv vergleichen zu können, sind quantitative Maße essentiell. Denn nach Zhai und Milgram (1998) ist nur durch die zusätzliche Betrachtung der Koordination ein tieferes Verständnis für die Eingabegeräte oder Interaktionstechnik möglich. Koordinationsmaße messen, wie koordiniert Bewegungen von Computernutzern sind. Bewegungen werden als koordiniert aufgefasst, wenn mehrere DoF gleichzeitig bewegt werden. Einige Maße setzten zusätzlich die gezielte Bewegung voraus, um von hoher Koordination zu sprechen.

Jacob et al. (1994) Jacob et al. analysieren hingegen Pfade eines 3D-Trackers und untersuchen die Bewegungspfade. Sie klassifizieren die Abschnitte in *Integrale*, sofern sie gleichzeitig in der x-y-Ebene und in z-Richtung verlaufen. Isolierte Bewegungen innerhalb einer Achse bezeichnen sie als *City-Block*-Bewegungen. Bewegungen, die sich nur in der x-y-Ebene abspielten wurden nicht gewertet. Das Verhältnis zwischen *Integrale* und *City-Block* wurde als Koordinationsmaß definiert. Je höher diese Zahl, desto mehr *Integrale* Bewegungen werden durchgeführt. Dies sind nach Auffassung der Autoren koordinierter.

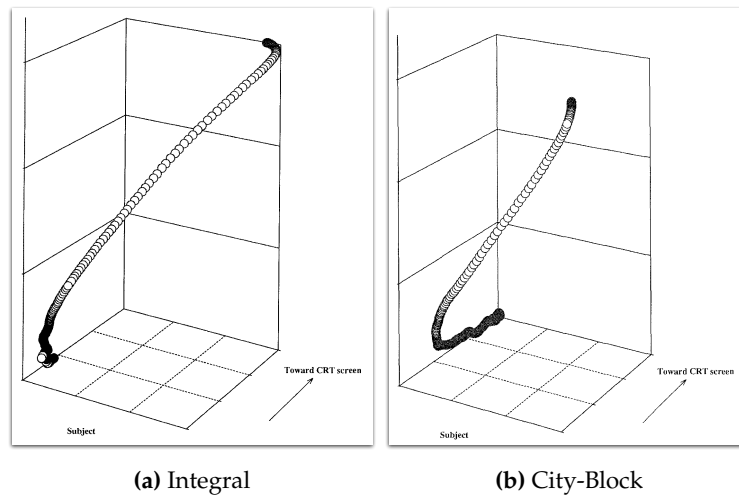


Abbildung 3.30.: Integral und City-Block Bewegungen (Jacob et al., 1994). Eine integrale Bewegung wird als koordiniert angesehen, da sie sich sowohl in der x-y-Ebene als auch in z-Richtung bewegt (a). City-Block Bewegungen sind hingegen weniger koordiniert, da sie einzelne Achsen sequentiell abgehen (b).

Zhai und Milgram (1998) Zhai und Milgram schlagen zwei Möglichkeiten vor, wie Koordination gemessen werden kann. Erstens als Verhältnis von zwei Zeitspannen, in denen das Interface parallel und nicht parallel verwendet wird. Parallel bedeutet, dass alle DoF verändert werden; nicht parallel, dass nur einzelne DoF verändert werden. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Zeitwerten könnte als Koordinationsmaß verwendet werden. Das bedeutet: Je öfter der Benutzer alle DoF gleichzeitig verändert, desto länger wird diese gemessene Zeit. Dies impliziert zugleich eine höhere Koordination der Bewegung. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass nicht berücksichtigt wird, ob die Bewegung überhaupt zielgerichtet ist. Aus diesem Grund schlagen Zhai und Milgram vor, das Verhältnis zwischen der Länge des hinterlegten Pfades und der Länge des Bewegungspfades als Koordinationsmaß zu verwenden. Analog dazu definieren sie dies für Rotation. Dabei gilt: Je kleiner diese Werte, desto koordinierter die Bewegung. Zhai und Milgram nennen ihr Koordinationsmaß *efficiency*:

$$C_{\text{efficiency_trans}} = \frac{\text{Länge des Bewegungspfades} - \text{Länge des kürzesten Pfades}}{\text{Länge des kürzesten Pfades}} \quad (3.6)$$

$$C_{\text{efficiency_rot}} = \frac{\text{Summe der durchgeführten Rotationen} - \text{Initialer Unterschied}}{\text{Summe der durchgeführten Rotationen}} \quad (3.7)$$

Um volle Bewegungen in 3D zu untersuchen, kombinieren Zhai und Milgram beide Maße mit einem weiteren Maß, dem *Rotation-Translation space*. Dieses Maß bildet die veränderte Konfiguration über eine Zeitfunktion. Diese beobachtet, ob beide Komponenten auch parallel und nicht nur sequentiell verändert wurden. Abbildung 3.31 illustriert das Koordinationsmaß am Beispiel einer *Docking*-Aufgabe in 3D.

Balakrishnan und Hinckley (2000) Balakrishnan und Hinckley schlagen für ihre zweihändige Interaktion ein Maß vor, dass sowohl die Parallelität der Nutzung als die Zielgerich-

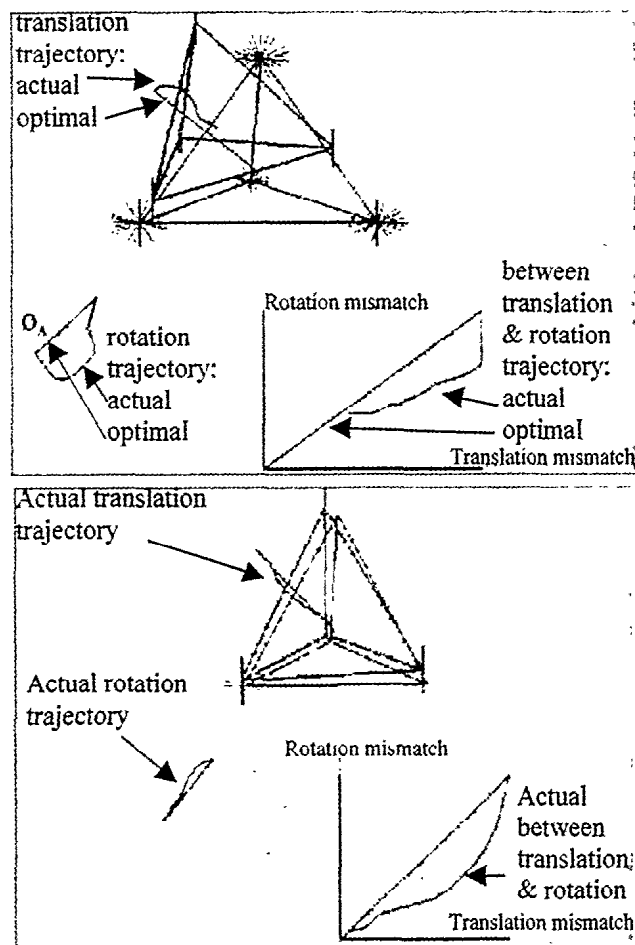


Abbildung 3.31.: Beispielanwendung des Koordinationsmaßes anhand einer Docking-Aufgabe (Zhai und Milgram, 1998). Die obere Abbildung zeigt einen laufenden Versuch. Die untere Abbildung zeigt einen abgeschlossenen Versuch. Zu sehen ist das Verhältnis zwischen dem aktuellen und dem optimalen Pfad für die Translation und Rotation in 3D sowie den Verlauf des *Rotation-Translation space*.

tetheit von Bewegungen berücksichtigt. Parallelität bedeutet für die Autoren demnach der gleichzeitige und zielgerichtete Einsatz beider Arme. Dabei messen sie für jede Hand, ob sie bewegt wird und ob sie dem vorgegebenen, sich bewegenden Ziel folgt. Das Ziel wird verfolgt, wenn der Abstand zu diesem Ziel in jedem Schritt reduziert wird. Diese Fehlerreduzierung (*Error Reduction, ER*) berechnen sich wie folgt:

$$\%ER = \frac{\text{aktuelle Bewegung in Richtung des Ziels}}{\text{Benötigte Bewegung, um den Fehler auf 0 zu reduzieren}} \quad (3.8)$$

Der daraus berechnete Wert liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 eine perfekte Verfolgung des Zielobjektes bedeutet und 0 gar keine. Das Verhältnis dieser Werte für die linke und rechte Hand ergibt das Maß für deren Koordination:

$$\%Parallelism = \frac{\%ER \text{ rechte Hand}}{\%ER \text{ linke Hand}} \quad (3.9)$$

Wobei der größere der beiden Werte in den Nenner kommt. Auch der Wert für *Parallelism* schwankt zwischen 0 und 1. Je größer dieser Wert, desto gleichzeitiger Arbeiten beide Hände bei gleicher Fehlerreduktion.

Stoelen und Akin (2010) Stoelen und Akin untersuchten in ihren Studien u. a. die parallele Ausführung von Rotation und Translation mit einem sensorbasierten System. Dazu definierten sie die Zeitspanne Δt_{mid} als Maß für Koordination. Δt_{mid} beschreibt die Zeitspanne zwischen den Zeitpunkten, wenn Translation und Rotation jeweils die halbe Wegstrecke erreicht haben. Muss Translation beispielsweise 10 cm und Rotation 20° zurücklegen, so werden zwei Zeitpunkte gestoppt:

1. t_1 , wenn die Translation 5 cm zurückgelegt hat.
2. t_2 , wenn die Rotation um 10° rotiert wurde.

Die Differenz zwischen den beiden Zeitpunkten ist dann Δt_{mid} . Je kleiner Δt_{mid} , desto koordinierter war ihrer Meinung nach die Bewegung.

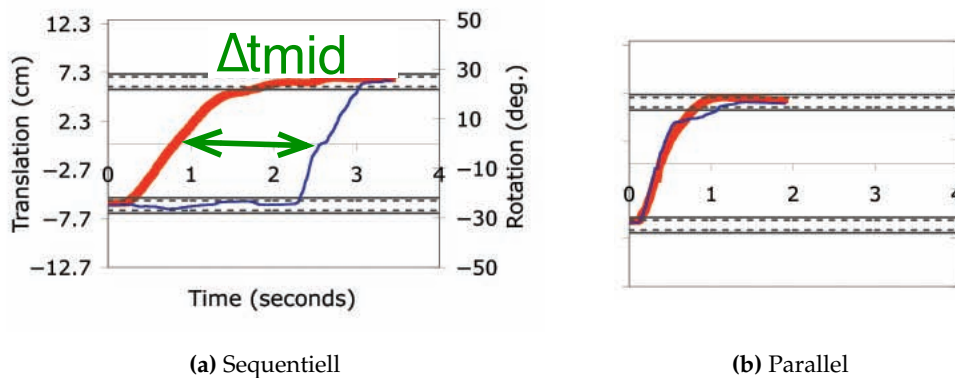


Abbildung 3.32.: Unkoordinierte und koordinierte Ausführung (Stoelen und Akin, 2010). Ein hohes Δt_{mid} (grüner Pfeil) zwischen Rotation (rot) und Translation (schwarz) zeigt eine sequentielle und damit unkoordinierte Bewegung (a). Bei paralleler Ausführung ist das Δt_{mid} minimal (b).

3.3.1. Fazit

Die hier vorgestellten Koordinationsmaße sind zur Messung von freien Bewegungen nicht geeignet. Sowohl Zhai und Milgram (1998) als auch Balakrishnan und Hinckley (2000) benötigen für ihr Maß entweder ein Zielpfad oder einen optimalen Pfad, d. h. in beiden Fällen muss es einen Vergleichspfad geben. Jacob et al. (1994) benötigen zwar kein Ziel, aber die Berechnung der Koordination ist nicht exakt genug, da sie nur binär entschieden, ob alle Achsen abgegangen wurden oder nur eine. Stoelen und Akin (2010) brauchen sowohl Start- als auch End-Konfigurationen, um die Koordination zu messen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Koordinationsmaß ermöglicht erstmals die genauere Messung von freien Bewegungen ohne Zielpfad und bekannten Konfigurationen.

3.4. Kinematische Ketten

Folgende Arbeiten befassen sich mit entweder mit der Performanz oder Ermüdung von kinematischen Ketten. Eine kinematische Kette ist ein bewegliches System aus einzelnen Gliedern, das über Gelenke verbunden ist (näheres siehe Abschnitt 2.3.2, Seite 35). In Kapitel 7 wird die sowohl die Ermüdung als auch die Performanz von *kinematischen Ketten* untersucht.

3.4.1. Performanz von kinematischen Ketten

Langolf et al. (1976) Langolf et al. zeigten in ihrer Studie, dass kürzere kinematische Ketten eine höhere Performanz aufweisen als längere. Als Wert für die Performanz verwendeten Langolf et al. den Kehrwert der Steigung ($1/b$) aus Fitts' Formel $MT = a + b \cdot ID$ mit *bits/s* als Maßeinheit. Je größer diese Zahl, desto performanter die entsprechende Eingabemodalität. So zeigten die Finger nach Langolf et al. eine Verarbeitungsrate von 38 *bits/s*. War das Handgelenk involviert, so sank der Wert auf 23 *bits/s*. Der Arm hingegen erreichte nur eine Bitrate von 10 *bits/s*. Durch die Auswahl der Abstände zwischen Start- und Endposition sowie Breite des Zielfeldes wurden die Versuchspersonen zur Nutzung bestimmter kinematischer Ketten gezwungen. So konnten die Versuchspersonen beispielsweise bei der kleinsten Breite des Zielfeldes (0.25 cm) ausschließlich die Finger einsetzen. Dies ermöglichte eine genaue Trennung der eingesetzten kinematischen Ketten und erlaubte damit eine genauere Berechnung der zugehörigen Performanz. Die Werte von Langolf et al. werden jedoch kritisch gesehen, da die Experimente nur von drei Versuchspersonen durchgeführt wurden und es dadurch zu diesen hohen Werten gekommen sein könnte (Balakrishnan und MacKenzie, 1997).

Rosenbaum et al. (1991) Im Gegensatz zu Langolf et al. (1976) wollten Rosenbaum et al. bei ihren Untersuchungen zusätzlich wissen, ob sich die Versuchspersonen bei freier Wahl auch für die effizienteste kinematische Kette entscheiden würden. Dazu wurde am ersten Tag der Untersuchung Messungen für Finger, Handgelenk und Arm durchgeführt. Jedes Gelenk wurde dabei auf je vier Distanzen gemessen. Dabei sollten sie innerhalb dieser Distanzen die vorgegebene kinematische Kette so schnell wie möglich bewegen, d. h. bei kurzen Distanzen die Finger, bei mittleren das Handgelenk und bei den weiten Distanzen den Unterarm. Die Durchführungen wurden aufgezeichnet und später analysiert. Am zweiten Tag wurden dieselben Versuchspersonen gebeten den Versuch erneut durchzuführen. Dieses Mal war es ihnen freigestellt mit welcher kinematischen Kette sie die Aufgabe lösten. Die Versuche wurden per Video für die Analyse aufgezeichnet.

Die Analyse der Videoaufzeichnungen zeigte, dass die Versuchspersonen auch bei freier Wahl die optimale kinematische Kette verwenden. Optimal bedeutet z. B. kurze kinematische Ketten für kleine Distanzen mit hoher Bewegungsfrequenz. Abbildung 3.33 illustriert das Ergebnis der Studie. Die markierte Diagonale zeigt die optimale Kombination aus kinematischer Kette, Frequenz und Distanz. Daran kann man z. B. erkennen, dass die Finger am häufigsten bei hoher Frequenz und kurzen Distanzen eingesetzt werden (linke obere Ecke).

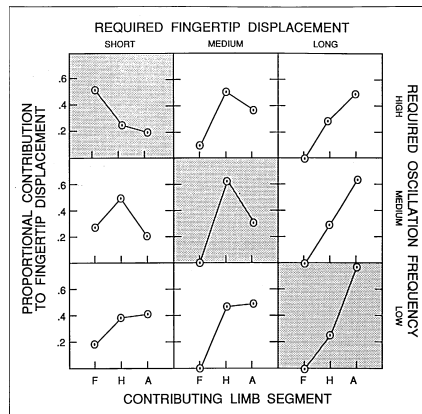


Abbildung 3.33.: Ergebnistabelle der verwendeten kinematischen Ketten (Rosenbaum et al., 1991). Die Tabelle zeigt die Verwendung der kinematischen Ketten in Relation zur Frequenz und Distanz der Bewegung. Die Finger wurden am häufigsten bei kurzen Distanzen und hoher Frequenz eingesetzt (linke obere Ecke). Die optimale Nutzung liegt auf der farblich markierten Diagonalen.

Zhai et al. (1996) Zhai et al. untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Muskelgruppen auf die Performanz bei der Kontrolle von mehreren DoF. Dazu wurden zwei Eingabegeräte mit je sechs DoF mit einer Aufgabe in 3D verglichen, die jeweils unterschiedliche Muskel- und Gelenkgruppen involvierten. Abbildung 3.34 zeigt die Aufgabe und die Eingabegeräte. Der Datenhandschuh wurde durch die groben Muskel- und Gelenkgruppen (Schulter, Ellbogen und Handgelenk) bewegt. Im Gegensatz dazu wurde *FingerBall* entwickelt, der nicht nur durch die groben, sondern auch durch die kleineren und feineren Muskel- und Gelenkgruppen (Finger) bedient werden konnte. Bei der Aufgabe handelte es sich um eine *Docking*-Aufgabe, bei der ein Objekt in ein anderes Zielobjekt überführt werden musste. In ihrer Studie zeigt *FingerBall* eine höhere Performanz, als der Datenhandschuh. Aus

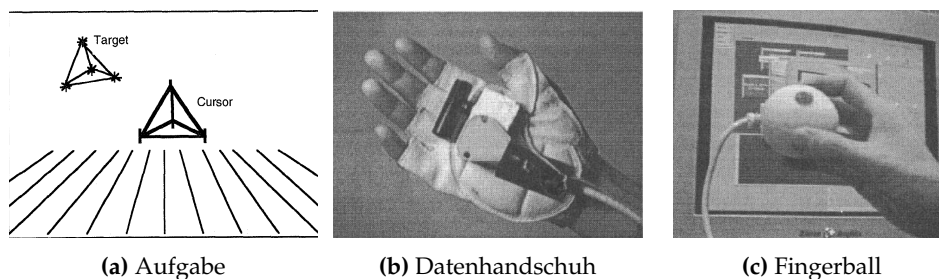


Abbildung 3.34.: Aufgabe und Eingabegeräte (Zhai et al., 1996). Die Aufgabe bestand darin einen Cursor in Form eines 3D-Objekts in ein Zielobjekt zu überführen (Abbildung (a)). Die Eingabegeräte aus der Studie waren ein Datenhandschuh (b) und *FingerBall* (c).

diesem Grund empfehlen Zhai et al. die Entwicklung von Eingabegeräten, die die unterschiedliche Performanz der kinematischen Ketten ausnutzen. Accot und Zhai (2001) weisen daraufhin, dass das Potenzial von Eingabegeräten nur ausgeschöpft wird, wenn damit auch ein sinnvoller Wechsel der involvierten Muskelgruppen, wie Zhai et al. es vorschlugen, erfolgt. So würde demnach der *FingerBall* keinen Vorteil bringen, wenn dieser wie beim Datenhandschuh mit dem Arm benutzt werden würde.

Balakrishnan und MacKenzie (1997) Auch Balakrishnan und MacKenzie untersuchten die Performanz von verschiedenen kinematischen Ketten. Die Aufgaben ähnelten den Aufgaben von Fitts, bei der die Versuchspersonen aber im Unterschied zu Fitts' Metallplatten zwei Felder auf einem Eingabetablet berührten. Die Felder hatten unterschiedliche Größen und lagen in unterschiedlicher Distanz zueinander. Die Ergebnisse von Balakrishnan und MacKenzie zeigten deutlich niedrigere Werte als Langolf et al. (1976). Die höchsten Werte konnten sie für die Bewegung messen, bei der ein Stift zwischen Zeigefinger und Daumen gehalten und dabei vor und zurück bewegt wurde. Dieser Wert war jedoch nur zu Finger- und Unterarmbewegung signifikant höher. Interessanterweise erzielte der Finger alleine die niedrigste Bandbreite von nur 2.96 *bits/s*. Damit war sie auch zu allen anderen Ketten die signifikant langsamste (siehe Abbildung 3.35). Dies stellt einen Widerspruch zu anderen Arbeiten dar, die die Finger als schnellste Kette identifizieren (Langolf et al., 1976; Rosenbaum et al., 1991; Zhai et al., 1996).

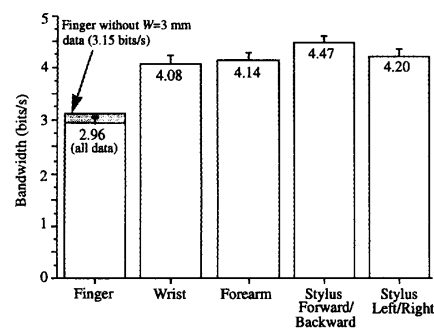


Abbildung 3.35.: Performanz der einzelnen kinematischen Ketten (Balakrishnan und MacKenzie, 1997). Die Bezeichnungen richten sich am größten involvierte Gelenk.

3.4.2. Ermüdung von kinematischen Ketten

Lozano et al. (2011) Um den Einsatz bestimmter Muskelgruppen bei Multitouch zu bestimmen, haben Lozano et al. die Muskelbewegungen der Versuchspersonen während der Bedienung eines iPads mithilfe von Sensoren gemessen. Zu den durchgeführten Aktionen zählten: Rotation nach links und rechts, Rein- und Rauszoomen sowie das *Panning* (Verschieben der Arbeitsfläche) mit dem Zeigefinger (oben, unten, links und rechts).

Die Ergebnisse zeigten höhere Aktivitäten des Streckmuskels im Handgelenk bei Interaktionen mit zwei Fingern als bei Interaktionen mit einem Finger. Das Verschieben mit einem Finger nach unten zeigt die geringsten Aktivitäten bei diesem Muskel. Auch bei Rotationen nach rechts besteht in diesem Muskel im Durchschnitt die höchste Muskelaktivität ebenso wie im Oberarmmuskel. Zudem zeigt Panning nach oben und unten auch eine hohe Beanspruchung des Oberarmmuskels. Mit diesen Ergebnissen erhalten Designer eine weitere Entscheidungsgrundlage um Interaktionstechniken ergonomischer zu designen. Beispielsweise empfehlen sie nach Möglichkeit zwei Finger bei Interaktionstechniken zu vermeiden, da diese zu einer erhöhten Beanspruchung der Muskulatur führt.

Hincapié-Ramos et al. (2014) Hincapié-Ramos et al. untersuchten die Ermüdung von sogenannten *Mid-Air-Gesten*. Dies sind Gesten, die in der Luft durchgeführt werden und häufig zur Steuerung von interaktiven Systemen eingesetzt werden. Solche Systeme verwenden beispielsweise Körper- oder Armbewegungen als Eingabe. Das bekannteste System ist Microsofts Kinect¹ (Zhang et al., 2012).

Zur Untersuchung der Ermüdung entwickelten Hincapié-Ramos et al. (2014) ein Maß zur Bestimmung der Ermüdung, die *Consumed Endurance* (CE). Diese berechnet sich nach:

$$CE(T, TotalTime) = \frac{TotalTime}{E(T)} * 100 \quad (3.10)$$

TotalTime ist die abgelaufene Zeit, seit der letzten Ruheposition des Arms. *E* beschreibt die berechnete maximale Ausdauerzeit, die der Arm noch bewegt werden kann, bis er wieder in die Ruheposition gebracht werden muss. *CE* ist somit das prozentuale Verhältnis zwischen abgelaufener und maximaler Zeit und kann daher auch als *verbrauchte Energie* oder die *aktuelle Ermüdung* interpretiert werden.

Um die Ermüdung zu untersuchen, wurden die Versuchspersonen gebeten, Objekte auf einem großen Display von einem Startpunkt auf einen Zielpunkt zu verschieben. Dabei wurde das Display einmal auf Schulterhöhe und einmal zentriert auf Bauchhöhe platziert. Zusätzlich variierte auch der Abstand zur Versuchsperson. Dieser konnte einmal < 35 cm (*gebeugt, bent arm*) und einmal > 35 cm (*gestreckt, extended*) betragen (siehe Abbildung 3.36).

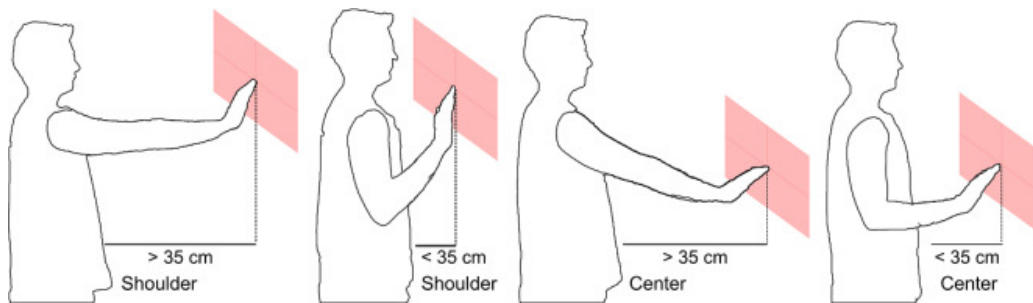


Abbildung 3.36.: Konfigurationen der Studie (Hincapié-Ramos et al., 2014). Die Studie variierte zwischen zwei Positionen der Interaktionsfläche (Schulterhöhe, Bauchhöhe) und zwei Armlängen (gebeugt < 35 cm, gestreckt > 35 cm).

Die Ergebnisse von Hincapié-Ramos et al. weisen auf die geringste Ermüdung bei der *Center*-Stellung des Displays und der gebeugten Haltung des Arms hin. Bei der Performanz konnten die Autoren keinen Unterschied zwischen den Konfigurationen feststellen. Das entwickelte Maß *CE* kann laut Hincapié-Ramos et al. helfen Interaktionstechniken und auch Interfaces zu optimieren. Beispielsweise haben die Autoren aufgrund der unterschiedlichen Ermüdung in den verschiedenen Zonen ein angepasstes Tastaturlayout entwickelt. Diese weist den Buchstaben mit der höchsten Häufigkeit in der englischen Sprache die Felder mit der niedrigsten Ermüdung zu. Abbildung 3.37 illustriert die Ermüdungsheatmap und das entworfene Tastatur-Layout.

¹<https://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>

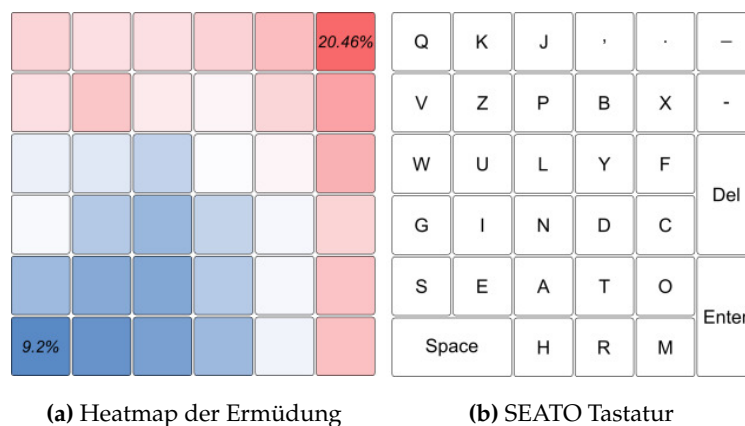


Abbildung 3.37.: Heatmap und korrespondierende SEATO-Tastatur (Hincapié-Ramos et al., 2014). Basierend auf der Heatmap (a), die die Ermüdung anzeigt (rot hoch, blau niedrig), wurde die SEATO-Tastatur entworfen (b).

Bachynskyi et al. (2015) Bachynskyi et al. untersuchten Tapping in verschiedenen Richtungen, um die Ermüdung und Performanz bei verschiedenen Multitouch-Display-Größen (siehe Abbildung 3.38) zu bestimmen. Zur Erfassung der Daten und deren Analyse wurden die Bewegungen durch ein Motion-Capture-System aufgezeichnet. Untersucht wurden fünf unterschiedliche Display-Größen, die unterschiedliche Muskelgruppen aufgrund der unterschiedlichen Arbeitshaltungen involvierten. Mithilfe der Motion-Capture-Daten wurden Biomechanische Simulationen durchgeführt, um die Belastung der involvierten Muskelgruppen zu identifizieren und zu analysieren. Die Ergebnisse liefern Hinweise zur Ergonomie und Performanz von unterschiedlichen Multitouch-Geräten. Beispielsweise weist der Laptop die niedrigste Performanz auf, ist aber dennoch in Bezug auf Ergonomie und Ermüdung für eine Langzeitnutzung geeignet. Große *Public Displays* haben zwar eine hohe Performanz, sind aber aufgrund der hohen Ermüdung für eine Langzeitnutzung nicht geeignet.

3.4.3. Fazit

In den vorgestellten Arbeiten zur Performanz von kinematischen Ketten wurde zur Ermittlung deren Performanz, oft die Verwendung der kinematischen Kette erzwungen. Dies geschah entweder durch Wahl der Distanzen, sodass die Versuchspersonen nur bestimmte Ketten für die jeweilige Distanz verwenden konnten (Langolf et al., 1976) oder die Gliedmaßen wurden fixiert (Balakrishnan und MacKenzie, 1997). Zusätzlich berücksichtigten Balakrishnan und MacKenzie in ihren Studien keine Oberarmbewegungen. Dadurch konnten sie zwar genaue Messungen der Performanz unter kontrollierten Bedingungen erfassen, aber es sind isolierten Performanzen aus einer künstlichen Situation heraus. Dadurch bilden sie womöglich nicht die reale Performanz bei natürlicher Haltung und realistischer Interaktion ab. Um ein realistischeres Bild zu erhalten, sollten die Versuchspersonen daher wie bei Rosenbaum et al. (1991) frei wählen dürfen, welche kinematische Kette sie einsetzen wollen. Dies erschwert zwar die Analyse der Performanz, bildet aber die natürliche Nutzung durch die Benutzer besser ab. Rosenbaum et al., 1991 untersuchten im Gegensatz zu dieser Studie

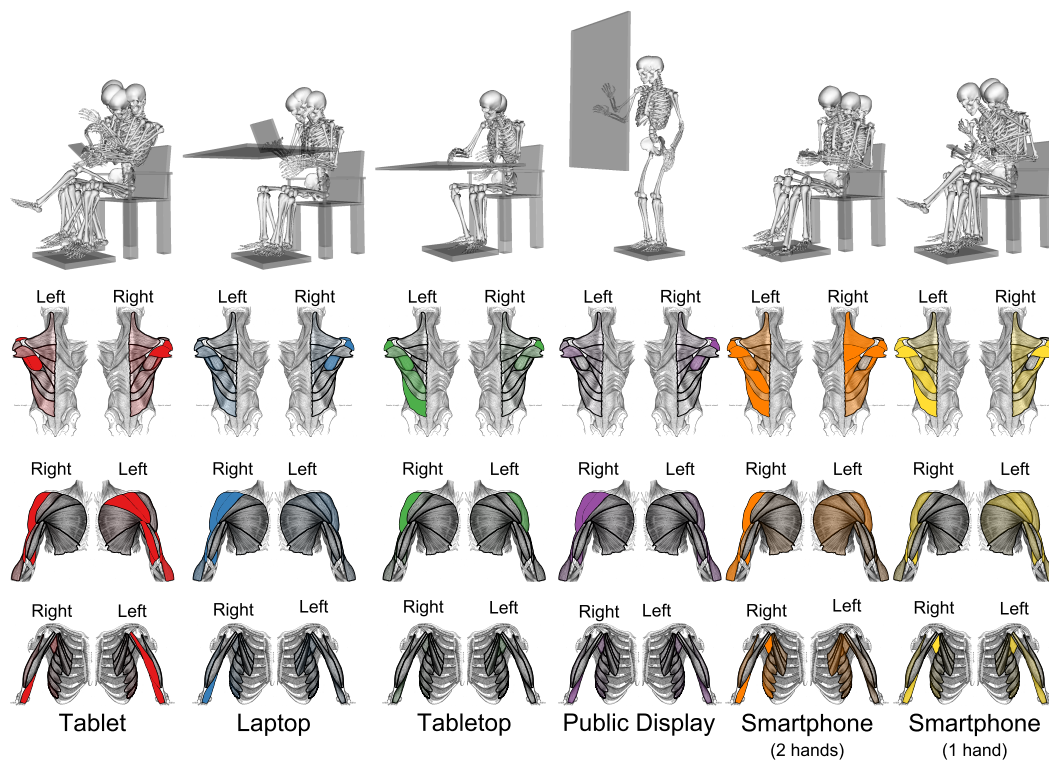


Abbildung 3.38.: Übersicht über Beanspruchung der Muskulatur über Displays-Größen (Bachynskyi et al., 2015). Untersucht wurden fünf verschiedene Displays-Größen, die unterschiedliche Muskelgruppen aufgrund der unterschiedlichen Arbeitshaltungen involvieren. Die farblichen Muskeln heben die involvierten Muskelgruppen hervor. Die Farbstärke deutet die Intensität des Muskeleinsatzes an.

keine Multitouch-Interaktionen. Aber ähnlich zu Rosenbaum et al. wird die Untersuchung der kinematischen Kette ebenfalls post-hoc über Videoanalysen durchgeführt. Zhai et al. (1996) untersuchen die Performanz der kinematischen Ketten anhand einer Aufgabe in 3D und mittels 6-DoF-Eingabegeräte, die sowohl Translation als auch Rotation des Objektes in 3D erzwingt. Die unterschiedlichen Performanzen zwischen den unterschiedlichen Eingabegeräte motiviert die systematische Analyse der Performanz von kinematischen Ketten für Multitouch-Geräte.

Lozano et al. (2011) und Bachynskyi et al. (2015) setzten Sensoren bzw. Motion-Capture-Systeme ein, um die Ermüdung und Belastung der Muskeln zu messen oder zu simulieren. Beide Ansätze ermöglichen eine exakte Bestimmung der Ermüdung und Belastung, jedoch verändern Apparaturen die natürliche Umgebung und Bewegung der Benutzer. Dieser Eingriff, könnte die Ergebnisse dadurch verfälschen, da die Benutzer sich anders verhalten oder in ihrer freien und natürlichen Bewegung gestört sind. Hincapié-Ramos et al. (2014) umgehen dieses Problem, indem sie eine Kinect einsetzen. Diese erkennt mithilfe von Tiefenkameras die Bewegungen der Nutzer. Dadurch müssen keine Sensoren an den Nutzern angebracht werden, sodass diese sich frei bewegen konnten. Aufgrund der technischen Einschränkungen der Kinect, müssen die Personen stehen und die Arme dürfen nicht zu nah am Körper sein. Nur so können die Bewegungen richtig erkannt werden. Daher ist der

Einsatz der Kinect zur Analyse von sitzenden Personen und somit im Kontext dieser Arbeit nicht geeignet.

3.5. Animationssysteme

Animation ist nach Parent (2001) die Bewegung von Objekten, die sich von selbst nicht bewegen können. Da die Gestaltung von Animationen in der Regel teures Equipment, hohes Fachwissen sowie spezielle Fähigkeiten und Fertigkeiten verlangt, untersuchten folgende Arbeiten den Einsatz von neuen Eingabemethoden, um Animationen kostengünstiger und intuitiver zu gestalten. Ziel dieser Arbeiten ist, dass unerfahrene Nutzer selbst komplexe Animationen durchführen können. In Kapitel 4 wird ebenfalls ein Animationssystem vorgestellt mit dem die freie Animation eines virtuellen 3D-Arms in Echtzeit möglich ist.

Dontcheva et al. (2003) Dontcheva et al. verwendeten in ihrer Arbeit ein Echtzeit-Motion-Capture-System mit acht optischen Kameras und mehreren sogenannten Widgets. Diese Widgets sind mit Motion-Capture-Markern versehene Gegenstände, die durch den Benutzer bewegt werden. Damit ist es möglich, die verschiedenen DoF des zu animierenden Objekts zu manipulieren. Die Manipulationen in der echten Welt werden dann auf die einzelnen Gelenke und Punkte auf dem Körper des Zielobjekts übertragen. Dies erfolgt durch die Erkennung der Bewegungen über das Motion-Capture-System und gleichzeitige Analyse zur Laufzeit. Die Übertragung an das Endobjekt kann dabei auf drei Arten geschehen:

1. *absolut mapping*: Bei dieser Methode werden die Weltkoordinaten als Referenz genommen. Alle Bewegungen werden direkt auf die Zielobjekte umgesetzt. Dieses Vorgehen wird verwendet, um beispielsweise Arme oder Beine während des Laufens zu animieren.
2. *trajector-relative mapping*: Dieses Mapping erlaubt die Animation von Objekten, die in Abhängigkeit zu anderen Bewegungen stehen. Dabei bleibt diese Abhängigkeit erhalten. Damit kann zum Beispiel der Kopf nachträglich animiert werden.
3. *additive mapping*: Bei Verstärkung oder Ausschmückung von bereits gefertigten Animationen wird diese Methode verwendet, da sie die Grundbewegung erhält. Dadurch sind kleinere Veränderungen auch noch nachträglich möglich sind, ohne die gesamte Animation neu durchzuführen.

Komplexe Bewegungen werden durch mehrere Aufnahmen auf verschiedenen Ebenen aufgezeichnet und übereinandergelegt (*Layering*). Dabei geht der Benutzer sequentiell vor, d. h. nachdem er eine Sequenz animiert hat, spielt er diese ab und animiert eine neue Sequenz (z. B. zuerst die Beine, anschließend die Arme). Dabei kann er jedes mal zwischen den drei obengenannten Methoden wählen. Abbildung 3.39 illustriert eine fertige Animation eines Kängurus. Die Animation des Kängurus wurde dabei in mehreren Animationschritten durchgeführt. Jeder Schritt wurde separat in einem Layer abgespeichert. Im ersten Schritt wurde der Weg des Kängurus festgelegt. Schritt zwei fügte das Beugen der Knie hinzu,

während die folgenden Schritte dann den Torso, den Kopf, die Arme und den Schwanz animierten.

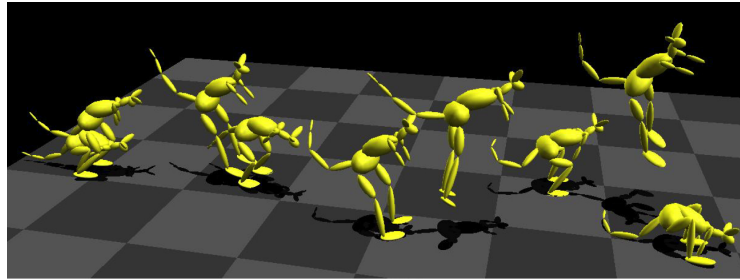


Abbildung 3.39.: Animationsbeispiel (Dontcheva et al., 2003). Die Animation des springenden Kängurus wurde in mehreren Animationschritten durchgeführt.

Oore et al. (2002) In ihrer Arbeit verwendeten Oore et al. ebenfalls Gegenstände (Bambusstöcke), um einzelne Körperteile (Beine oder Arme) zu animieren (Abbildung 3.40). Dabei

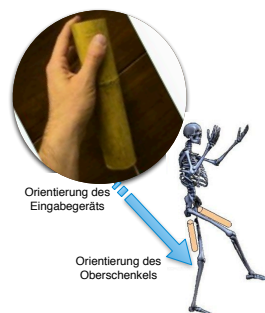


Abbildung 3.40.: Interface mit Bambusstöcken (Oore et al., 2002). Die Orientierung der Eingabegeräte, die im oberen Bereich von Bambusstöcken platziert wurden, beeinflussen die Orientierung der zu kontrollierenden Gliedmaßen. In diesem Beispiel bewegt sich der Oberschenkel immer parallel zum Bambusstock.

wird wie bei Dontcheva et al. mit Hilfe von verschiedenen Schichten, die ebenfalls nacheinander aufgenommen werden, die Endanimation zusammengesetzt. Insgesamt können mit diesem System ebenfalls mehrere DoF animiert werden, die jedoch in einzelne Gruppen zusammengefasst werden. So kann der Benutzer Beine, Arme, Hände und Oberkörper separat mit Hilfe der Bambusstöcke animieren. Um die Bewegungen durch die verschiedenen Schichten sanft und natürlich aussehen zu lassen, setzen Oore et al. Filter ein, die die Intensität der Eingabe über die Bambusstöcke steuert. Setzt man beispielsweise den Wert des Filters auf 0, so hat die Eingabe keine Auswirkung auf die Bewegung. Bei 1 geht sie ungefiltert in die Animation ein. Damit kann man die Bewegung des Kopfes während des Gehens steuern, indem man den Filterwert soweit senkt, dass es nicht zu ruckartigen, unnatürlichen Bewegungen des Kopfes kommt.

Igarashi et al. (2005) Igarashi et al. verwenden das sogenannte *spatial keyframing*, um Animationen durchzuführen. Dabei legt der Benutzer bestimmte Punkte im Raum fest, zu der

jeweils eine bestimmte Pose generiert wird (siehe Abbildungen in 3.41). Hat der Benutzer

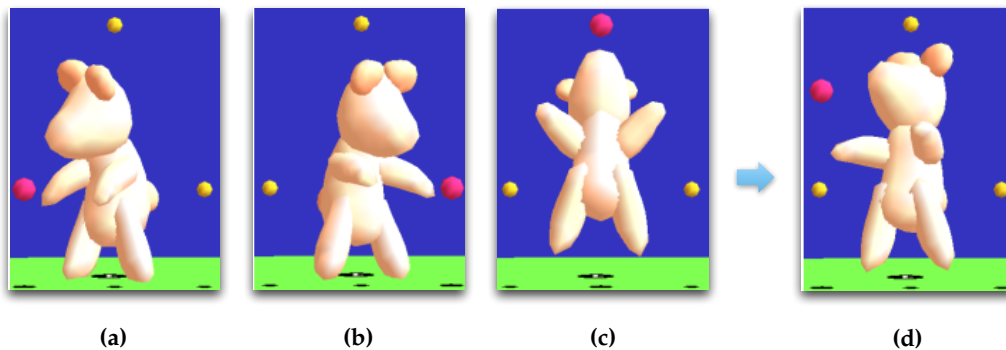


Abbildung 3.41.: *Spatial keyframe* Animation (Igarashi et al., 2005): Das Beispiel zeigt wie eine Animation mit drei Schlüsselposen erstellt werden kann. Die gelben Kugeln markieren drei verschiedene Posen, die der Benutzer über das Interface definiert hat (a), (b), (c). Bild (d) zeigt die Animationsphase, in der der Benutzer den roten Ball frei bewegt. Die Posen der Animation werden in Abhängigkeit zur Position des Balls zwischen den drei vordefinierten Schlüsselposen interpoliert.

diese Schlüsselpositionen (gelbe Punkte) festgelegt, kann er über die Bewegung der Maus den Charakter animieren. Die Position des Cursors (roter Punkt) legt die interpolierte Pose der Figur fest. Die Interpolation ist dabei von den festdefinierten Posen abhängig. Durch die Interpolation der Posen zur Laufzeit entsteht eine fließende Animation.

Neff et al. (2007) Neff et al. stellen in ihrer Arbeit *Correlation Map* vor. Mit Hilfe dieser können Eingabegeräte mit geringen DoF, Skelette mit mehreren DoF steuern bzw. manipulieren (siehe Sequenz in Abbildung 3.42). *Correlation Map* kodieren dabei Beziehungen zwischen

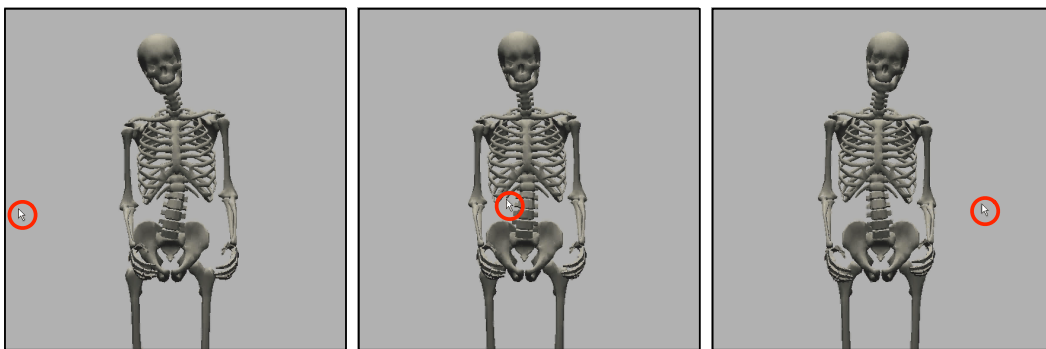


Abbildung 3.42.: Animation mit *Correlation Map* (Neff et al., 2007). Das Skelett folgt dem Mauszeiger (rot markiert). Gleichzeitig bewegt sich sowohl die Wirbelsäule als auch der Kopf mit.

den Bewegungen des Eingaberaums auf Bewegungen des Skelettraums. Beispielsweise erzeugt eine Abwärtsbewegung mit der Maus ein Überbeugen des Körpers. Zusätzlich kodieren sie Beziehungen zwischen den verschiedenen Parametern einer Pose. So führt z. B. die Drehung des Rückens zu einer Drehung des Halses und dem Beugen der Knie. Jede *Correlation Map* definiert, wie die einzelnen Dimensionen (x oder y) einer Mausbewegung, eine oder mehrere Parameter einer Pose verändert. Durch Inverse Kinematik und Algorithmen zur Balancierung des Skeletts, wird anschließend die finale Pose berechnet. Jede definierte

Correlation Map arbeitet mit einem absoluten Mapping, d. h. jeder Punkt im Eingaberaum gehört zu einem bestimmten Parameterwert im Ausgaberaum. Der Benutzer kann jedoch die Anfangsposen des Skeletts bestimmen. Beim *absoluten Mapping* wird die Startpose durch die Position des Startpunkts der Mausbewegung definiert. Beim *relativen Mapping* wird die aktuelle Konfiguration der Skelett-Pose als Startpose der Interaktion benutzt. Das System erlaubt die Verwendung mehrerer Correlation Maps zur gleichen Zeit.

Walther-Franks et al. (2012) Walther-Franks et al. stellen mit *Dragimation* ebenfalls ein System für die Performance Animation vor. *Dragimation* erlaubt das spätere Anpassen von Bewegungsabläufen entlang eines Pfades bezüglich Timing und Dynamik. Dazu muss die Animation des Objekts entlang des entsprechenden Pfades bereits vorliegen. Anschließend kann der Animierer die Bewegung nachträglich anpassen, indem er das Objekt in der gewünschten Geschwindigkeit entlang des Pfades bewegt und diese Bewegung dabei aufzeichnet. Bewegt er z. B. das Objekt langsam, so kann er eine Bewegung in Slow-Motion erzeugen. Die dazugehörigen Keyframes werden während der Bewegung angezeigt, sodass der Animierer ein sofortiges Feedback seiner Anpassung bekommt. Abbildung 3.43 illustriert den Ablauf einer Animation mit *Dragimation*. Der Benutzer bewegt das Objekt mit dem gewünschten Tempo innerhalb des Pfades. Das neue Timing wird anschließend auf die Keyframes übertragen.

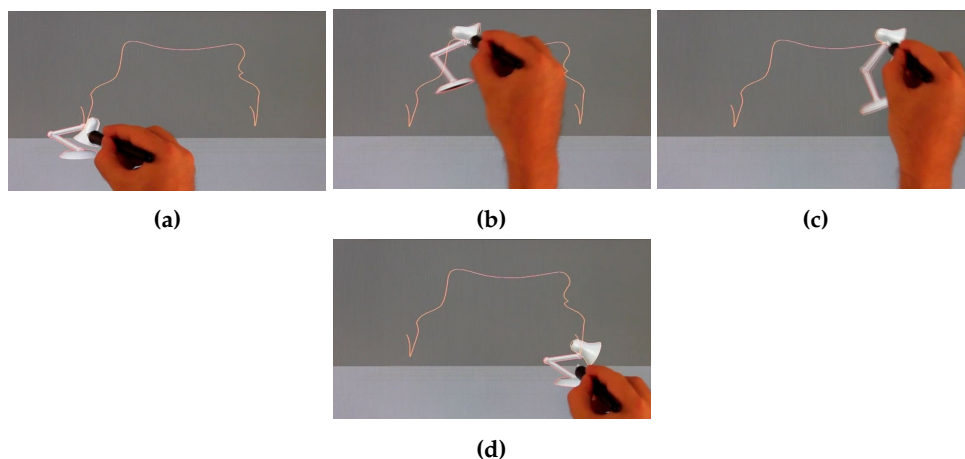


Abbildung 3.43.: Animation mit *Dragimation* (Walther-Franks et al., 2012). Der Benutzer bewegt das Objekt innerhalb des Pfades ((a)–(d)). Das neue Timing wird anschließend auf die Keyframes übertragen. Damit der Benutzer direktes Feedback zu seinen Bewegungen erhält, wird während des ganzen Prozesses die Keyframes angezeigt.

Lockwood und Singh (2012) Lockwood und Singh erstellen mit *FingerWalk* aus Fingerbewegungen und deren Abdrucksprofilen Animationssequenzen. Dazu simulieren Zeige- und Mittelfinger menschliche Gehbewegungen auf einem Multitouch-Display. Die Auflagefläche der Finger, die entsteht, wenn der Finger die Multitouch-Oberfläche berührt, wird aufgezeichnet und im Anschluss analysiert. Durch Klassifizierungsalgorithmen werden die aufgezeichneten Punkte bestimmten Bewegungen wie z. B. Rennen oder Springen

zugeordnet. Dazu werden diese Berührungspunkte nach folgenden vier Eigenschaften untersucht:

- dem Verhältnis zwischen den Zeiten bei keinem, einem und zwei Kontaktpunkten.
- der durchschnittlichen Beschleunigung.
- der durchschnittlichen Schrittfrequenz.
- den durchschnittlichen Abstand zwischen zwei Kontaktpunkten.

Über eine automatische Klassifizierung wird dann eine Bewegung aus einer Animationsbibliothek ausgewählt und mit diesen Parametern angepasst (siehe Abbildung 3.44).

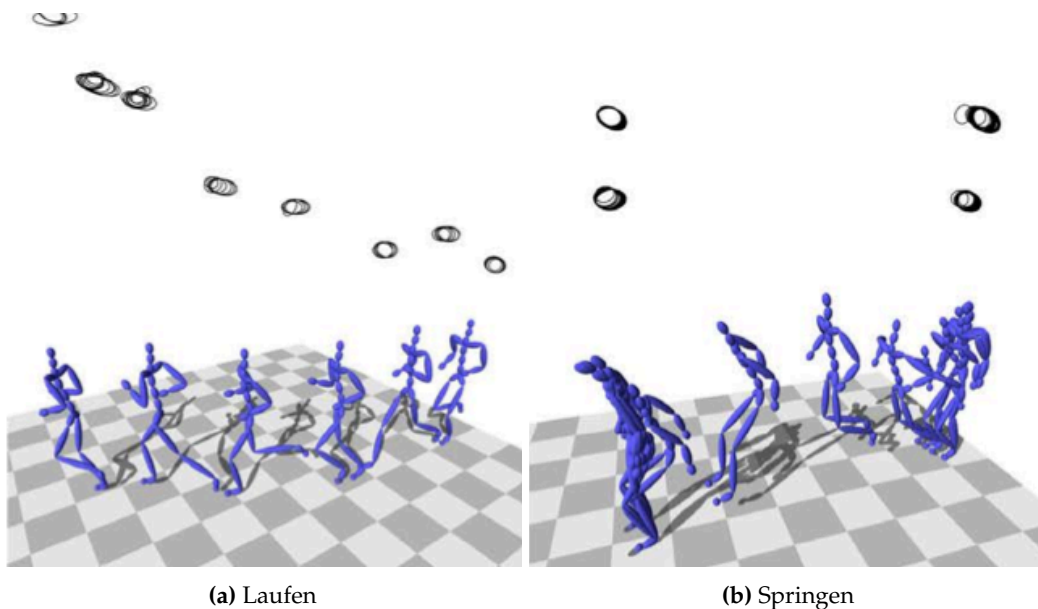


Abbildung 3.44.: Laufanimation mit *FingerWalk* (Lockwood und Singh, 2012). Aus Abdrucksprofilen von Fingern können Animationen erzeugt beispielsweise Laufanimation (a) oder Sprunganimationen (b) erzeugt werden. Die dazugehörigen Fingerabdrücke sind über den Animationen zu sehen.

Achibet et al. (2015) Achibet et al. stellen eine Lösung zur Animation einer Hand mit einem Multitouch-Display eines Tablets vor. Die Steuerung der Finger erfolgt über inverse Kinematik und ermöglicht die gleichzeitige Steuerung von 16 DoF, indem für jeden Finger Slider auf dem Multitouch-Display angezeigt werden. Diese werden auf die Bewegungskurven der End-Effektoren, die auf den Fingerspitzen liegen, gemappt (siehe Abbildung 3.45). Zur Veränderung der Handorientierung und -position kann das Tablet geneigt und bewegt werden. Diese Bewegungen werden direkt auf die virtuelle Hand übertragen.

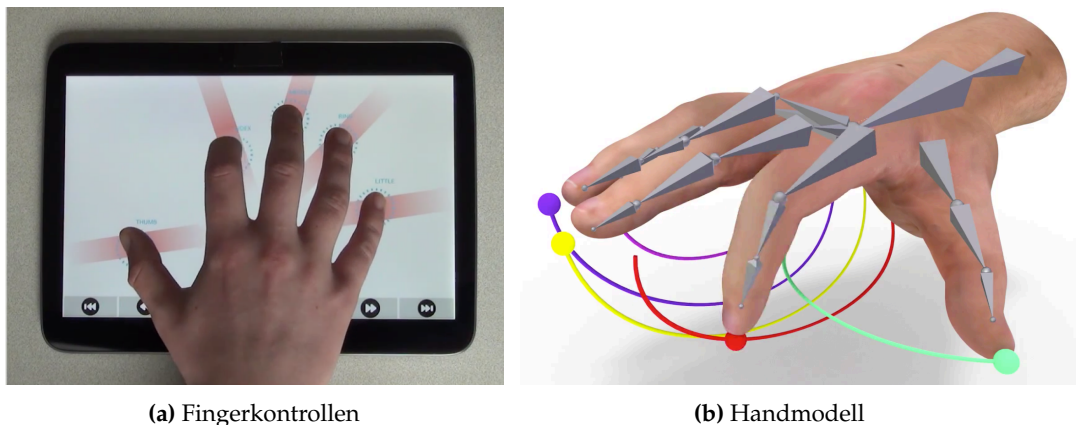


Abbildung 3.45: *THING*-Interface (Achibet et al., 2015). Das Interface besteht aus Slidern die als Steuerelemente (rote Balken) mit den Fingern bedient werden (a). Diese berechnen die Positionen der End-Effektoren (farbliche Kugeln in (b)) über Inverse Kinematik auf den vorgeschriebenen Bewegungskurven (farbliche Linien). Die aktuelle Positionen der Kugeln bestimmen die Handpose.

3.5.1. Fazit

Die Correlation Map von Neff et al. (2007) erlaubt keine direkten und spontan-freie Bewegungen, da diese in aufwendigen Vorarbeiten definiert werden müssen. Die Technik von Igarashi et al. (2005) erzielte gute Ergebnisse bei groben Bewegungen die den ganzen Körper involvierten, wie tanzen oder gestikulieren. Sie ist jedoch nicht für präzisere Bewegungen geeignet, da sie nur Bewegungen innerhalb der vordefinierten Schlüsselposen ermöglicht. Dieses Konzept wird daher verwendet, um die Handformen der virtuellen Hand zu steuern (Kapitel 4). Dontcheva et al. (2003) sowie Oore et al. (2002) setzen auf aufwendiges Equipment und ermöglichen komplette Animationen nur mithilfe von verschiedenen Layern. Dragimation von Walther-Franks et al. (2012) erlaubt interaktiv Animationen zu korrigieren. Mit diesem System können daher nur bestehende Animationen bezüglich Timing und Dynamik korrigiert werden. Es ist nicht möglich neue Animationen zu erstellen. Mit der Lösung von Achibet et al. (2015) wären theoretisch Echtzeit-Animationen möglich, da die Veränderung der Kontrollen sich unmittelbar auf die virtuelle Hand auswirkt, aber die Autoren sehen die Stärken ihres Systems bei der Erstellung von Schlüsselposen für die Key-Frame-Animation. Ebenso ermöglicht dieses Interface nur die Animation einer Hand und nicht eines kompletten Arms.

Koordinierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden

„Will man Schweres bewältigen, muss man es sich leicht machen.“

Bertolt Brecht, 1898–1956, deutscher Dramatiker und Lyriker

Zur Etablierung eines Multitouch-Display als alternatives Eingabegerät müssen dessen Stärken effektiv einsetzbar sein. Zu diesen Stärken gehört u. a. die parallele und isolierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden (DoF). Innerhalb dieses Kapitels kann mithilfe einer Studie gezeigt werden, dass unerfahrene Multitouch-Nutzer generell in der Lage sind, diese Stärken zu nutzen. Sie konnten gleichzeitig mehrere DoF zufriedenstellend und koordiniert steuern, um eine hochkomplexe Aufgabe zu lösen. Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden auf der internationalen *ACM Konferenz Interactive Tabletops and Surfaces* publiziert (Kipp und Nguyen, 2010).

4.1. Einleitung

Nachdem im vorherigen Kapitel die Grundlagen und der theoretische Hintergrund dieser Arbeit behandelt wurden, befasst sich dieses Kapitel mit folgenden Forschungsfragen: Sind unerfahrene Multitouch-Nutzer überhaupt in der Lage, gleichzeitig mehrere Freiheitsgrade mit den Fingern zu kontrollieren? (F1). Erfolgt die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch koordiniert? (F2). Verschlechtert sich die Effizienz durch die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch im Vergleich zu Maus und Tastatur? (F3).

Eine kontrollierte Nutzung beinhaltet, das Multitouch bewusst und gezielt einzusetzen, um eine anstehende Aufgabe erfolgreich und effizient zu erledigen. Bei einer koordinierten Nutzung geht es darum, ob unerfahrene Nutzer die Stärken und Möglichkeiten des

Multitouch tatsächlich ausschöpfen. Es geht demnach um die Qualität der Nutzung und nicht nur um die Aufgabenlösung. Zu den Stärken des Multitouch gehört u. a. die gleichzeitige Veränderbarkeit mehrerer DoF. Menschen sind generell dazu in der Lage, komplexe Handbewegungen auszuführen und dabei mehrere DoF gleichzeitig zu verändern. Dies demonstrieren traditionelle Handpuppenspieler mit ihren Fähigkeiten, durch komplexe Finger- und Handbewegungen Holzpuppen zum Leben zu erwecken. Auch im Alltag kommen ähnlich komplexe Bewegungen vor, die den Menschen allerdings trotzdem als einfach erscheinen – beispielsweise erfordert das Schuhebinden eine komplexe Koordination der einzelnen Finger. Diese Fähigkeiten sind im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion als *Ganze-Hand-Eingabe (Whole-Hand Input)* bekannt (Sturman, 1992).

In diesem Kapitel wird untersucht, ob diese Fähigkeiten auch bei einem komplexen Multitouch-Interface zum Tragen kommen. Als Aufgabe diente die Animation eines virtuellen menschlichen 3D-Arms über ein Multitouch-Display, dessen Interface zwar komplex, jedoch leicht zu erlernen war (siehe Abbildung 4.1). Der Arm ist Teil einer virtuellen 3D-Puppe mit menschlicher Skelettstruktur in einem 3D-Raum. Das Ausrichten menschlicher Skelettstrukturen ist eine komplexe Aufgabe (Nguyen, 2009; Nguyen und Kipp, 2009). Sie findet sich in der Regel in der Unterhaltungsbranche wie Film- und Computerspiele-Industrie wieder. Aber auch in sehr spezifischen, professionellen Kontexten, beispielsweise bei der Fernsteuerung von Roboterarmen im Weltall oder Unterwasser wird sie eingesetzt. In diesen Fällen erfordern die speziellen Eingabegeräte ein hohes Level an Expertenwissen sowie spezielle Fertigkeiten, über die Laien nicht verfügen. In dieser Studie wird diese komplexe Aufgabe auf einen für Laien verständlichen Kontext und das Eingabegerät Multitouch übertragen. Damit soll gezeigt werden, dass selbst unerfahrene Multitouch-Nutzer hoch komplexe Aufgaben lösen können und dass Multitouch in Kombination mit einem geeigneten Interface neue Möglichkeiten eröffnet.

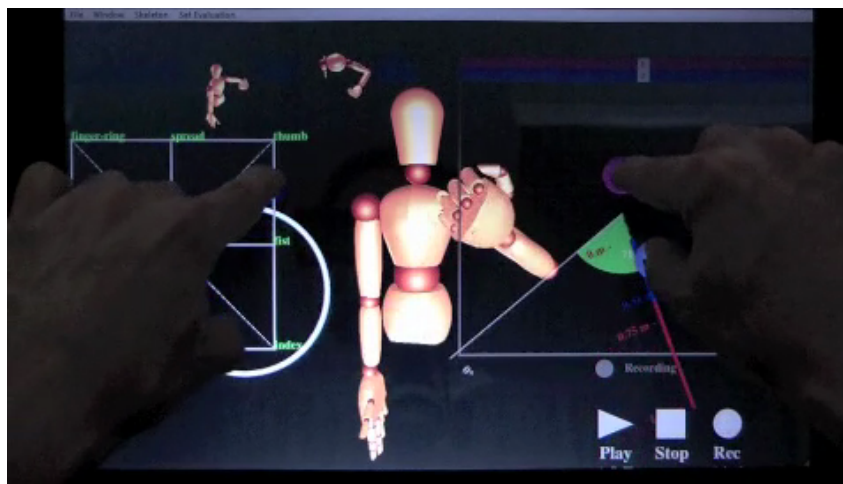


Abbildung 4.1.: Multitouch-Interface. Ein virtueller 3D-Arm wird mithilfe eines Multitouch gesteuert.

4.2. Studie

In dieser Studie sollen Effizienz, Koordination und Benutzerzufriedenheit eines Maus- und eines Multitouch-Interface bei Animationsaufgaben miteinander verglichen werden. Es soll gezeigt werden, ob die Effizienz von Multitouch als neues und unbekanntes Eingabegerät an die Effizienz von bekannten Eingabegeräten wie Maus und Tastatur herankommen kann. Zusätzlich soll untersucht werden, ob die Vorteile des Multitouch ausgenutzt werden und diese einen Effizienzvorteil bringen. Die Stärke des Multitouch liegt in der simultanen Kontrolle von mehreren DoF. Konkret sollen folgende Hypothesen überprüft werden:

Hypothese H1: Unerfahrene Nutzer sind in der Lage, mehrere DoF kontrolliert zu steuern. Hancock et al. (2007) konnten zeigen, dass Benutzer bei komplexeren Aufgaben mit Interaktionstechniken besser zurecht kommen, wenn mehrere DoF angeboten wurden.

Hypothese H2: Das Arbeiten mit dem Multitouch-Interface ist schneller als das mit dem Maus-Interface. Dies liegt daran, dass sich mit dem Multitouch-Interface mehrere DoF gleichzeitig steuern lassen.

Hypothese H3: Die Bewegungen mit dem Multitouch-Interface weisen eine höhere Koordination auf als die mit dem Maus-Interface. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Multitouch-Interface mehrere DoF gleichzeitig steuern kann.

Hypothese H4: Die Koordination mit dem Multitouch-Interface erhöht sich über die Zeit.

4.2.1. Aufgabe

Angelehnt an Barnes et al. (2008) wurden drei Aufgaben entworfen, deren Anforderungen an die Koordination der Bewegungen von einer Aufgabe zur nächsten Aufgabe stiegen. Mit jeder Aufgabe wurden aufeinander aufbauend Bedingungen eingebaut, die zunehmend koordiniertes Arbeiten erzwangen. Die ersten beiden Aufgaben waren *Posenerstellung* sowie *Pfadverfolgung* und dienten dem Vergleich von Effizienz und Koordination. Hierbei war nur die Armsteuerung relevant, sodass die Versuchspersonen lediglich vier DoF unimanual steuern mussten. Die dritte Aufgabe war eine Kreativ-Aufgabe, bei der die Benutzerzufriedenheit mithilfe von Echtzeit-Animationen ermittelt wurde, die mit dem Multitouch-Interface erstellt wurden. Bei dieser Aufgabe kam das gesamte Multitouch-Interface mit insgesamt acht DoF zum Einsatz. Die Steuerung erfolgte dabei bimanual. Da freie Improvisationen nur schwer zu messen bzw. objektiv zu bewerten sind (Neff et al., 2007), wurde auf einen Vergleich der Kreativ-Aufgabe mit den anderen beiden Aufgaben bewusst verzichtet. Auch wurde die Kreativ-Aufgabe nicht mit der Maus durchgeführt, da kein Maus-Interface gefunden werden konnte, das einen fairen Vergleich mit dem Multitouch ermöglicht hätte. Dazu hätte das entsprechende Maus-Interface in der Lage sein müssen, dieselbe Anzahl von DoF wie das Multitouch-Interface parallel zu bearbeiten. Eine Lösung mit zwei Mäusen wurde verworfen, da bei dieser Art der Steuerung ein permanentes optisches Feedback notwendig gewesen wäre (Balakrishnan und Hinckley, 1999). Das Verfolgen der Echtzeit-Animation hätte einen ständigen Fokuswechsel des Blickfeldes

erforderlich gemacht, wodurch ein unfairer Nachteil für dieses Interface bestanden hätte. Zusätzlich hätte die gleichzeitige Bedienung von zwei Mäusen eine höhere Einarbeitungs- bzw. Trainingszeit erfordert (Forlines et al., 2007).

Aufgabe 1: Posenerstellung

Ziel dieser Aufgabe war es, einen Arm von einer Startpose aus in eine grafisch angedeutete Armkonstruktion zu überführen (siehe Abbildung 4.2a). Die finale Armpose erforderte die Anpassung des Arm-Swivel und der Handorientierung. Handformen wurden dabei nicht berücksichtigt. Transparente Kugeln deuteten die Position des Ellbogens, Handgelenks und des Daumens an. Wurde das zugehörige Gelenk in die entsprechende Kugel bewegt, so änderte sich die Farbe der Kugel von rot in grün. Diese änderte sich wieder in rot, sobald das Gelenk wieder herausbewegt wurde. Abbildung 4.2b zeigt die Armposition mit korrekter Ausrichtung von Ellbogen und Handgelenk, aber mit falscher Handorientierung. Sobald alle Gelenke richtig positioniert waren, wurde die Aufgabe automatisch als gelöst gewertet. Diese Aufgabe begünstigte eine sequentielle Strategie, bei der die Hand zuerst in der x-y-Ebene und dann in z-Richtung bewegt wird. Abschließend konnte die Handorientierung eingestellt werden.

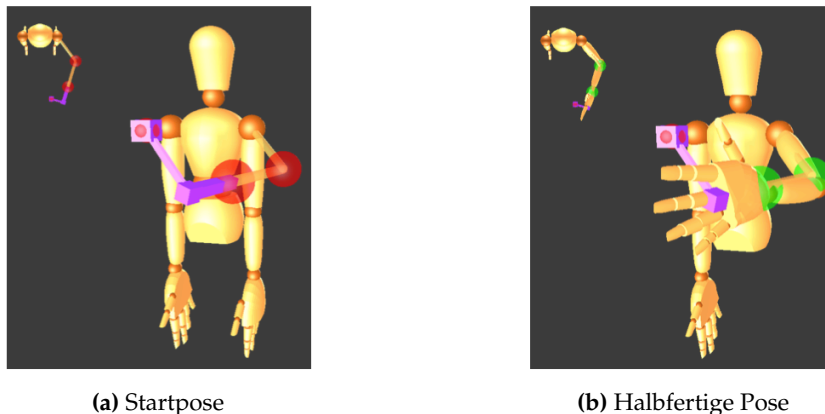


Abbildung 4.2.: Aufgabe 1 Posenerstellung. (a) Neutrale Startpose mit dem angedeuteten Zielarm. Die roten Kugeln zeigen die Endpositionen von Ellbogen, Handgelenk und Daumenspitze an. Sobald die Gelenke die Kugeln erreichen, wechselt ihre Farbe zu grün. (b) Pose mit korrekter Ausrichtung für Ellbogen und Handgelenk, aber mit falscher Handorientierung.

Aufgabe 2: Pfadverfolgung

Ziel von Aufgabe 2 war es, einen eingblendeten Pfad in einer vorgegebenen Reihenfolge abzugehen. Nach Foley et al. (1984) ist eine solche Aufgabe eine der elementaren Interaktionsaufgaben (siehe Abschnitt 2.1.3, Seite 19). Der Pfad wurde mithilfe von kleinen Kugeln dargestellt, die durch Linien miteinander verbunden waren (siehe Abbildung 4.3). Die Richtung des abzugehenden Pfades wurde zusätzlich über ein animiertes Lauflicht visuell dargestellt. Dieses Lauflicht war ein zyklisches Leuchten einzelner Kugeln in einer bestimmten Reihenfolge. Die Richtung des Lauflichtes gab die Bewegungsrichtung

an. Um eine visuelle Überladung der Szene durch zu viele Kugeln zu vermeiden, wurden nur maximal zehn Pfadpunkte gleichzeitig angezeigt. Zusätzlich halfen Verbindungslinien, sogenannte z-Bars, zwischen den Pfadkugeln und der x-y-Ebene auf Höhe der Puppe, die Abstände der Kugeln zu erfassen. Sobald ein Pfadpunkt in richtiger Reihenfolge berührt wurde, verschwand dieser. Dadurch waren nur Kugeln zu sehen, die noch nicht abgegangen wurden. Das Verschwinden einer Pfadkugel wurde mit einem *Plopp*-Geräusch untermalt, während gleichzeitig ein neuer Pfadpunkt am Ende des Pfades hinzugefügt wurde. Beim Abgehen des Pfades wurde der Arm-Swivel und die Handorientierung vernachlässigt. Aus diesem Grund wurde die Hand der Puppe durch eine einfache Kugel ausgetauscht, um die Szene nicht zu überladen. Zusätzlich wurde der Arm leicht transparent dargestellt, sodass der Arm den Pfad nicht vollständig verdecken konnte.

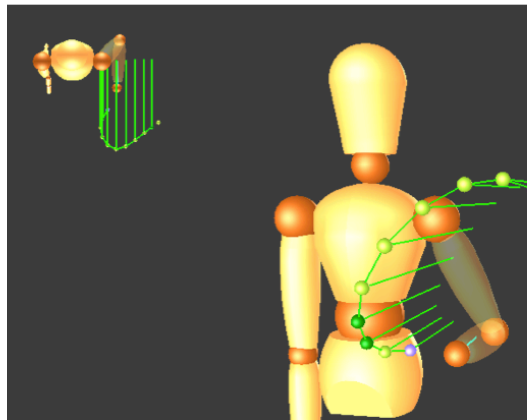


Abbildung 4.3.: Aufgabe 2 Pfadverfolgung. Der abzulaufende Pfad wird durch grüne Kugeln dargestellt. Die grünen Verbindungslinien von den Kugeln zur x-y-Ebene soll das Erfassen des Abstandes vereinfachen.

Aufgabe 3: Kreativ-Aufgabe

Innerhalb der Kreativ-Aufgabe wurde das komplette Multitouch-Interface mit allen Steuerelementen eingesetzt und getestet. Dadurch sollte ein Eindruck gewonnen werden, ob das entworfene Multitouch-Interface generell als Interface für die Performance-Animation geeignet ist und welche Qualität dabei zu erwarten wäre. Da im Designprozess und Vorstudien kein vergleichbares Maus-Interface für einen fairen Vergleich gefunden werden konnte, wurde diese Aufgabe nur mit dem Multitouch-Interface durchgeführt. Trotz der Verfügbarkeit von Multitouch-Mäusen wie der *Magic Mouse* von Apple¹, die mehr DoF als normale Mäuse hat, wurde bewusst eine Standardmaus eingesetzt, da diese allen Versuchspersonen bekannt war und deshalb als eigentlicher Konkurrent des Multitouch angesehen werden kann.

Bei der Aufgabe wurden die Versuchspersonen aufgefordert vier Audiodateien mit passenden Bewegungsanimationen zu untermalen. Dies erfolgte in Echtzeit, während die Audiodatei lief. Die vier Dateien unterschieden sich in Art und Ausdruck. Es handelte sich

¹<http://www.apple.com/de/magicmouse/>

um zwei Musikstücke sowie zwei Sprachaufnahmen. Musikstück *M1* war ein Pop Song mit einem starken Beat². Musikstück *M2* war eine langsame, romantische Pop Ballade³. Die Sprachaufnahmen stammten von einer männlichen und einer weiblichen Person. Der männliche Sprecher *S1* agierte *harsch* und *energievoll*⁴. Die weibliche Sprecherin *S2* war hingegen *weich* und *melodisch*⁵. Die Musikstücke dauerten jeweils 40 Sekunden; die Sprachaufnahmen 10–20 Sekunden.

4.2.2. Interface-Design

Das übergeordnete Ziel beim Interface-Design war es, so viele DoF wie möglich bei der Eingabe nutzbar zu machen. Dennoch sollte die Erlernbarkeit des Interface so einfach wie möglich bleiben. Deshalb sollten die von Sturman (1992) definierten Eigenschaften der Hand genutzt werden. Sturman zeigte, dass die Hand schwierige und komplexe Aufgaben lösen kann, da sie bei der Eingabe eine hohe *Anpassungsfähigkeit (Adaptability)*, eine hohe *Natürlichkeit (Naturalness)* sowie die Fähigkeit zur *Koordination komplexer Teilbewegungen (Dexterity)* besitzt.

Das zu implementierende Interface musste in der Lage sein, den beweglichen Arm der virtuellen Puppe zu steuern. Dies erforderte die gleichzeitige Steuerung von mehreren Gelenken mit mehreren DoF. Die zu steuernden Gelenke waren

- Schulter: 3 DoF (Schwenken und Rotieren des Arms)
- Ellbogen: 1 DoF (Beugen des Arms)
- Handgelenk: 1 DoF (Rotation um die Achse des Unterarms für die Handorientierung)
- Hand und fünf Finger: 2 DoF für die Fingerwurzel, je 1 DoF für die beiden Daumengelenke und die anderen Fingergelenke (Beugen und Spreizen der Finger)

4.2.3. Grafische Benutzeroberfläche

Die Handform ist ein wichtiger Bestandteil der Animation bei der vorliegenden Aufgabe. Auf eine direkte Manipulation nach Shneiderman (1983) wurde bewusst verzichtet, da der steuernde Finger unmittelbar auf dem End-Effektor der kinematischen Kette liegen würde und diese nicht vollständig sichtbar wäre. Demnach wäre die Hand der virtuellen Puppe verdeckt und die Steuerung der Handform bzw. der Handorientierung nur schwer möglich. Deshalb wurden in zwei Regionen des Display unabhängige Kontrollflächen definiert, die die Steuerelemente für die Hand bzw. den Arm der 3D-Puppe beinhalteten. Die Trennung in zwei unabhängige Kontrollflächen für die Hand- und Armkontrolle führte zu einem bimanualen asymmetrischen Kontrollinterface mit einem unabhängigen Referenzrahmen für die Arme.

²Bee Gees „Night Fever“

³Celine Dion „My Heart Will Go On“

⁴Marcel Reich-Ranicki (Deutscher Literatur Kritiker) im „Literarischen Quartett“

⁵Elisabeth Gilbert (Amerikanische Schriftstellerin) auf ihrem TED Talk 2009

Die Steuerelemente wurden jeweils mit zwei Fingern jeder Hand bedient. Damit die Hände ständig im Sichtfeld des Benutzers bleiben und er dadurch ein visuelles Feedback über seine Bewegungen während der Eingabe erhält, wurde das Multitouch-Display auch als Ausgabegerät verwendet. Die Visualisierung beschränkte sich auf die Darstellung der Puppe und der Kontrollflächen. Bei einer Arbeit der Hände in unabhängigen Regionen mit unabhängigem Referenzrahmen führt visuelles Feedback nach Balakrishnan und Hinkley (1999) zu einer besseren Performanz. Deshalb wurden zwei weitere Regionen zur Visualisierung genutzt.

In mehreren Pilotstudien zeigte sich, dass 2D-Displays zur Visualisierung von 3D-Szenen bei Laien zu Schwierigkeiten beim Erkennen der 3D-Szene führten. Um die Validität der Benutzerstudie nicht negativ zu beeinflussen, wurden zahlreiche Maßnahmen zur verbesserten Wahrnehmung der 3D-Szene getroffen wie verschiedene Betrachtungswinkel und Brennweiten (siehe Abbildung 4.4). Es wurden zunächst mehrere Ansichten der Szene aus verschiedenen Perspektiven am oberen Rand des Displays platziert. Die Analyse der Pilotstudien ergab jedoch, dass die meisten Ansichten bei zeitkritischen Aufgaben ignoriert wurden und somit wenig hilfreich für die Versuchspersonen waren. Aus diesem Grund wurden in die Endversion für die Aufgaben 1 und 2 lediglich zwei Ansichten (Abbildung 4.4b) bzw. für Aufgabe 3 drei Ansichten (Abbildung 4.4a) übernommen. Bei Aufgabe 2 wurden visuelle Marker eingefügt – sogenannte z-Bars, die parallel zur z-Achse verliefen und aus dem Display *herausragten* (siehe Abbildung 4.4c). Jede z-Bar verband die Kugeln der Pfadverfolgung mit der x-y-Ebene. Dadurch wurde zusätzliche Tiefeninformation visualisiert. Somit konnten die Positionen der Kugeln präziser eingeordnet werden.

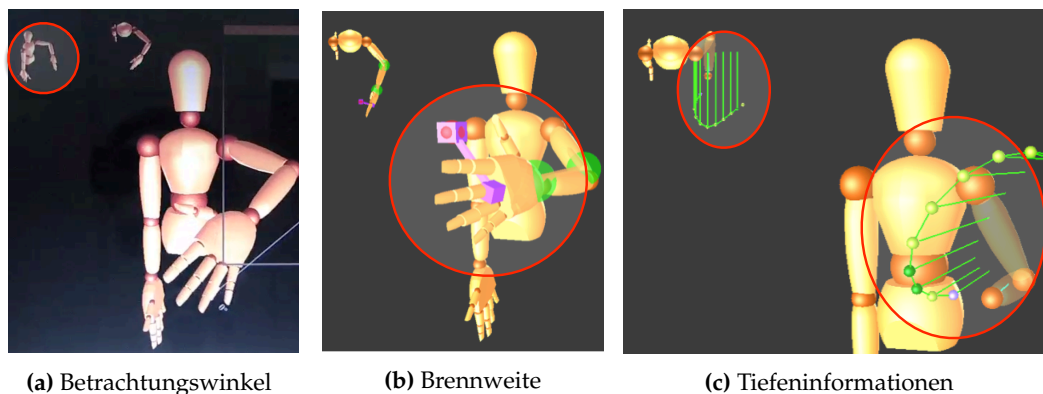


Abbildung 4.4.: Maßnahmen zur Verbesserung der Lesbarkeit von 3D-Szenen (rot markiert). Für Aufgabe 3 wurde ein zusätzlicher Betrachtungswinkel eingefügt (a). Die Veränderung der Brennweite als Weitwinkel lässt nahe Objekte übertrieben groß erscheinen (b). Visuelle Marker unterstützen die Verarbeitung von Tiefeninformationen (c).

Das Multitouch-Display wurde in vier verschiedene Bereiche unterteilt (siehe Abbildung 4.5):

Hauptansicht (1): Diese nimmt den größten Platz ein und zeigt die virtuelle Puppe aus einer leicht seitlichen Perspektive von vorne. Für die Kameraeinstellung wurde eine kleine Brennweite gewählt. Dadurch erscheinen nahe Objekte wie beispielsweise die

Hand beim ausgestreckten Arm überproportional groß. Diese Verzerrung erleichtert dem Benutzer visuell das Erkennen der 3D-Szene.

Vogelperspektive (2): Diese zeigt die virtuelle Puppe von oben. Sie sollte dem Benutzer helfen, genau zu sehen, wo sich die Hand der Puppe auf der z-Achse befindet (Tiefe). Bei den beiden zeitkritischen Aufgaben 1 und 2 wurde nur diese Perspektive eingeblendet. Während der Kreativ-Aufgabe war eine zusätzliche Variante der Vogelperspektive, die die Puppe seitlich von oben zeigte, zu sehen.

Morph-Map (3): Innerhalb der Kontrollfläche im linken Display-Bereich befindet sich die Morph-Map, das Steuerelement zur Kontrolle der Hand. Mit der Morph-Map werden vorgegebene Varianten von Handform und Orientierung der Hand verändert.

Arm-Kontrollfeld (4): Innerhalb der Kontrollfläche im rechten Display-Bereich kann der Benutzer mit seinem Finger den Arm der Puppe steuern. Zur besseren Orientierung im 3D-Raum wurde im Hintergrund der Kontrollfläche ein statisches Bild der Puppe als *Landkarte* platziert. Die Positionierung des Arms erfolgt dabei über eine absolute Positionierung. Das bedeutet: Jeder Punkt auf der Landkarte ist einem eindeutigen Punkt innerhalb der Szene zugeordnet.

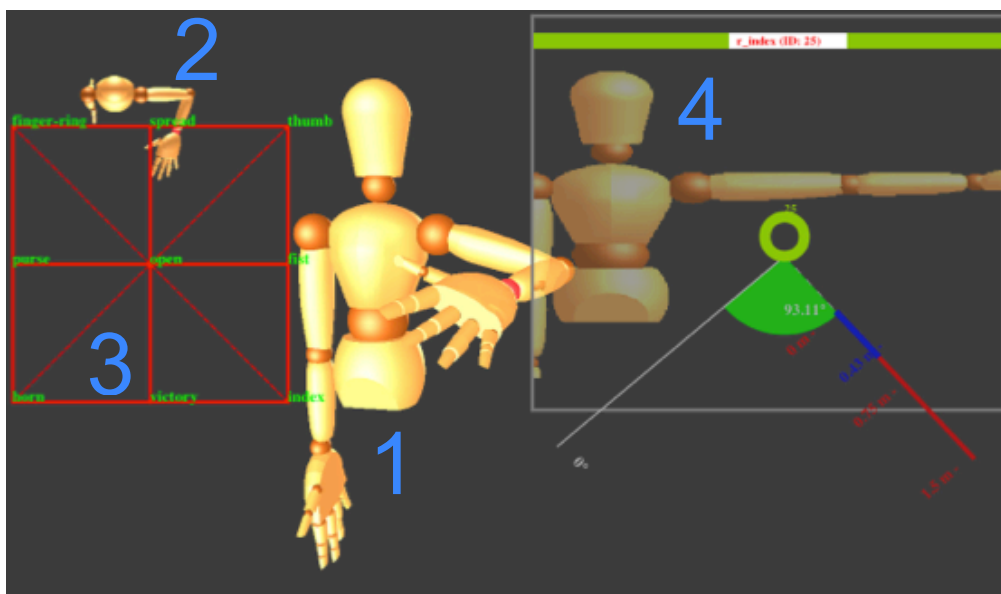


Abbildung 4.5.: Die vier Zonen der Benutzeroberfläche. Hauptperspektive (1) und Vogelperspektive (2) zur Visualisierung der 3D-Puppe. Morph-Map zur Handkontrolle (3) sowie die Armkontrolle (4). Der Aufsatz des Fingers bei der Armkontrolle wird mit einer grünen Kreisfläche angezeigt. Die Hilfslinien dienen der Orientierung, um den Winkel des Arm-Swivel und den Abstand der Hand vom Körper besser einschätzen zu können. Der Arm-Swivel bezeichnet die Stellung des Ellbogens durch die Rotation der Schulter.

4.2.4. Eingabe-Interfaces

Wie von Jacob et al. (1999) vorgeschlagen, wird die Funktionslogik der folgenden Interfaces mithilfe von Datenfluss-Diagrammen veranschaulicht. Mit dieser Darstellung können Interfaces als Mapping vom Input-Raum (Finger-Koordinaten, Tasten-Druck, Maus-Scrollrad, Mausposition usw.) in einen Output-Raum (Arm-Swivel, 3D-Position der Hand) dargestellt werden. Dieses Mapping kann dabei mehrere Transformationsschritte beinhalten. Der Arm-Swivel bezeichnet die Stellung des Ellbogens durch die Rotation der Schulter.

Die ovalen Formen repräsentieren in den Diagrammen die Eingabe, die Rechtecke die Transformationen und die Rauten die Ausgabe. Dadurch kann am Diagramm direkt abgelesen werden, welcher Finger für welche Eingabe verwendet wird oder ob es sich um ein absolutes oder relatives Mapping der Eingabe handelt. Absolute Positionierung bedeutet beim vorliegenden Interface, dass jeder Punkt im Eingaberaum (Multitouch-Display) genau auf einen Punkt im Ausgangsraum (3D-Szene) abgebildet wird. Auch wenn dies zu Sprüngen in der Animation führt, kann dies die Positionierung deutlich beschleunigen. Zusätzlich kann das absolute Mapping für Menschen ohne Erfahrung in der 3D-Navigation die Gewöhnung an den 3D-Raum erleichtern. Durch die leichte Lesbarkeit werden Untersuchungen des Design-Space und die Feinabstimmung des Endsystems erleichtert.

Der IK-Algorithmus kann aufgrund nicht eindeutiger Lösungen immer wieder unerwünschte Posen produzieren (siehe Abschnitt 2.3.3, Seite 36). Auch verursacht dieser ständige Veränderungen des Arm-Swivel, der Orientierung der Hand und des Handgelenks. Dies rief in den Vorstudien Irritationen bei den Nutzern hervor. Aus diesem Grund wurden zwei zusätzliche DoF eingeführt, um den Arm-Swivel und die Handorientierung manuell zu kontrollieren. Dadurch wurden diese durch die IK-Berechnungen nicht mehr verändert.

Zusammenfassend werden Steuerelemente für folgende Eingangsparameter benötigt:

1. Position der Hand (3 DoF)
2. Arm-Swivel (1 DoF)
3. Orientierung der Hand (1 DoF)
4. Handform (1 DoF)

Multitouch-Interface

In den ersten Versionen des Multitouch-Interface wurde die Idee verfolgt, so viele Finger wie möglich einzusetzen. Nach Sturman (1992) besitzt die menschliche Hand beim *Whole-Hand Input* die Fähigkeit, komplexe Teilbewegungen zu koordinieren, um komplexe Aufgaben zu lösen. Kin et al. (2009) stellten fest, dass unerfahrene Benutzer bei Selektionsaufgaben intuitiv mehrere Finger verwenden, wobei Zeige- und Mittelfinger präferiert werden. Deshalb wurde das Interface ursprünglich so entworfen, dass es mit drei Fingern der rechten Hand gesteuert wurde: Der Zeigefinger steuerte die Position des Arms in der x-y-Ebene (siehe Abbildung 4.6). Der Daumen kontrollierte mit der *Pinch*-Geste die z-Ebene der Hand. Die

Handorientierung wurde mit der *2-Punkt-RT*-Technik mit dem Zeigefinger als Pivotpunkt verändert. Der Arm-Swivel wurde durch Bewegungen des Mittelfingers nach oben und nach unten variiert.

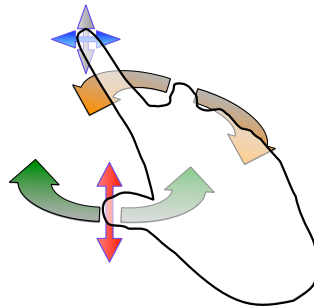


Abbildung 4.6.: Die Steuerung des 3D-Arms beim ersten Interface-Prototyp mit drei Fingern. Der Zeigefinger steuert die x-y-Ebene (blau), der Daumen variiert Handorientierung (grün) und deren Distanz zum Körper (rot). Der Mittelfinger kontrolliert den Arm-Swivel (orange).

Die Evaluation dieses Interface zeigte eine zu hohe Komplexität. Die Benutzer waren nicht in der Lage, die unterschiedlichen Steuerelemente sowohl kognitiv als auch motorisch zu trennen. Aufgrund der vielen DoF, die gleichzeitig zu kontrollieren waren, fiel es ihnen schwer, sich zu merken, welcher Finger für welche Bewegung bzw. Aktion zuständig war. Nach wiederholtem und längerem Üben waren die Benutzer zwar in der Lage, sich das Mapping zu merken, konnten die Bewegungen jedoch nach wie vor nicht gleichzeitig ausführen. Die Versuchspersonen gaben an, dass die eingeschränkte motorische Kontrolle ihrer Finger die größte Herausforderung darstellte. Insbesondere der Mittelfinger konnte auch nach langer Übungsphase nicht zufriedenstellend und flüssig eingesetzt werden. Es war den Testpersonen nicht möglich, ihn isoliert und unverkrampft zu bewegen, was zu einer hohen Frustration und Schmerzen führte.

Die Vorstudie zeigte, dass die Verwendung mehrerer Finger in diesem Falle zu einem nicht intuitiven und schwer erlernbaren Interface geführt hatte. Die Komplexität war zu hoch, um die gewünschten DoF noch intuitiv und effizient steuern zu können. Aus diesem Grund wurde die Idee verworfen, mehr als zwei Finger zu verwenden. Dies bedeutete: Um den virtuellen Arm mit nur einer Hand steuern zu können, hätte die Anzahl der steuerbaren DoF reduziert werden müssen. Da jedoch die Anzahl der DoF erhalten bleiben sollte, um den Vorteil von Multitouch zu erhalten, fiel die Entscheidung stattdessen auf ein bimanuales Interface. Dazu wurden die Steuerung für Hand und Arm separiert und auf jeweils eine Hand des Benutzers verteilt. Die zugehörigen Kontrollflächen wurden entsprechend in zwei verschiedenen Regionen des Multitouch-Display platziert. Wegen der gleichen Bewegung beider Hände und Finger, sollte es nach Annett und Bischof (2013) keine Einbußen in der Koordination und der Performanz geben. Die dominante Hand steuert den Arm (*Armsteuerung*); die nicht-dominante linke Hand (*Handsteuerung*) die Hand der Puppe.

Auf den ersten Blick könnte die Steuerung der Hand über die nicht-dominante Hand des Nutzers im Widerspruch zu Guiards Prinzip gesehen werden. Nach diesem gibt die nicht-dominante Hand bei bimanualen Arbeiten den groben Rahmen vor, während die dominante Hand die feinen bzw. präzisen Bewegungen innerhalb dieses Rahmens kontrolliert (Guiard, 1987). Da jedoch bei der Animation die Bewegung des Arms im Raum die komplexere Bewegung darstellt und dies gegenüber der Kontrolle der Handorientierung eine höhere Präzision erfordert, hält das Interface Guiards Prinzip ein.

Armsteuerung Die Pose eines Arms kann durch die Position der Hand im 3D-Raum und der Stellung des Arm-Swivel definiert werden. Mithilfe der Armsteuerung werden diese Faktoren durch zwei Finger der dominanten Hand gesteuert und verändert (siehe Diagramm in Abbildung 4.7). Dabei kontrolliert immer der obere Berührungspunkt die Position der Hand innerhalb der x-y-Ebene, der untere Berührungspunkt kontrolliert den Arm-Swivel. Damit folgt das Interface nicht dem *Order-based* Ansatz nach Benko und Feiner (2007), bei dem die Reihenfolge des Fingeraufsatzes die Funktion vorgibt. Durch die feste Zuteilung wurde vermieden, dass der Daumen zum Pivotpunkt für die Rotation wird, sollte er zuerst aufgesetzt werden. Dies schafft eine zusätzliche Robustheit. Die Veränderung des Abstands zwischen Daumen und Zeigefinger steuert die Tiefe (z-Koordinate) der Hand.

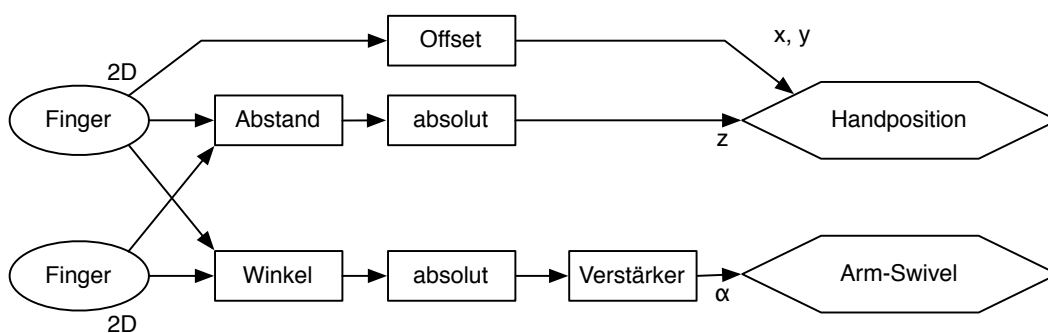


Abbildung 4.7.: Logikdiagramm der Armkontrolle. Dargestellt ist die Logik des bimanualen Interface der dominanten rechten Hand. Handposition und Arm-Swivel werden zur selben Zeit gesteuert.

Der Arm-Swivel wird durch den Winkel definiert, der zwischen den zwei Berührungspunkten und einer fixen Achse eingeschlossen ist (siehe Abbildung 4.8). Die Einstellung des Arm-Swivel wird über eine absolute Positionierung der Rotation umgesetzt. Dies entspricht der *2-Punkt-RT*-Technik nach Hancock et al. (2006). Zusätzlich wurde ein *C:D Gain* für den Arm-Swivel definiert, damit der Benutzer bei dessen Rotation innerhalb der *Komfortzone* bleiben kann. Die *Komfortzone* ist der Bereich, in dem das Handgelenk mühelos interagieren kann. So kann der Benutzer den kompletten Rotationsumfang des Arm-Swivel problemlos einstellen. Auch für die z-Koordinate der Hand wurde ein absolutes Mapping umgesetzt. Der oberste Berührungspunkt wurde stets für die Positionierung der Hand verwendet; der untere steuert die Rotation und die z-Koordinate der Hand. Die explizite Steuerung des Arm-Swivel reduziert die Wahrscheinlichkeit von unnatürlichen Posen. Auf die Gelenklimitierungen, die in der Regel zur Vermeidung falscher Posen eingesetzt werden, konnte daher verzichtet werden. Dies steigert zusätzlich die Performanz der IK-Berechnung.

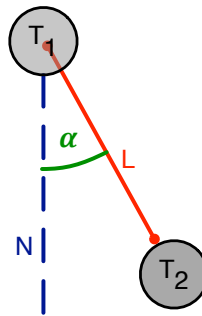


Abbildung 4.8.: Darstellung der 2-Punkt-RT-Technik. T_1 und T_2 sind die Berührungspunkte der Finger. N ist eine zu y parallele Achse. α definiert den Arm-Swivel.

Handsteuerung Die nicht-dominante Hand des Benutzers steuert zwei Aspekte der virtuellen Hand: die Orientierung der Handfläche und die aktuelle Handform (z. B. Faust, geöffnete Hand, erhobener Zeigefinger usw.). Die Kombination von zwei verschiedenen Aufgaben innerhalb eines Steuerelements erscheint auf den ersten Blick nicht intuitiv. Die Rotation kann jedoch ohne eine Veränderung der Handform erfolgen, indem der Zeigefinger ruht und nur der Daumen bewegt wird. Dadurch wird es für den Benutzer wiederum leicht zu entscheiden, welchen Aspekt der Hand er verändern will. Abbildung 4.9 illustriert die Funktionslogik der Handsteuerung. Auch hier wurde die Funktionalität der Berührungspunkte nicht nach dem *Order-based* Prinzip nach Benko und Feiner (2007) zugewiesen. Die Benutzer wurden dazu instruiert, den Zeigefinger als Pivotpunkt und zur Steuerung der Handform zu verwenden. Damit wurde sichergestellt, dass der Zeigefinger immer der oberste Berührungspunkt ist. Mithilfe des Daumens wurde der Winkel für die Handorientierung ermittelt. Die Berechnung des Winkels erfolgt wie beim Arm-Swivel (siehe Abbildung 4.8).

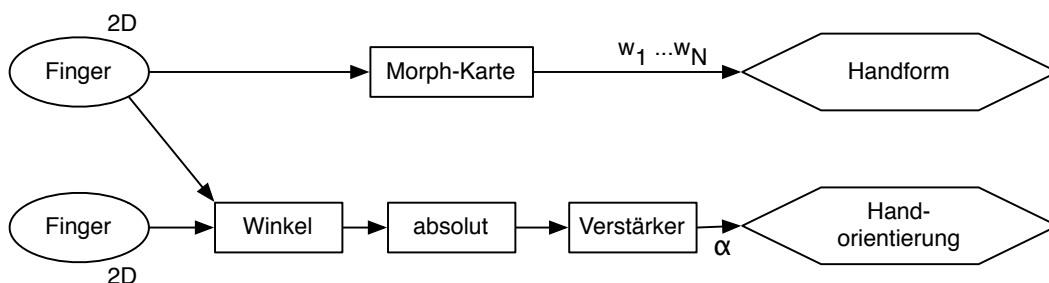


Abbildung 4.9.: Logikdiagramm der Handsteuerung. Darstellung der Logik der nicht-dominanten, linken Hand des bimanualen Interface. Die Handform und die Handorientierung werden zur gleichen Zeit gesteuert. $w_1 \dots w_N$ sind die Gewichtungen zur Berechnung der interpolierten Handform.

Um die Handform zu verändern, wurde eine sogenannte *Morph-Map* verwendet (siehe Abbildung 4.10). Diese funktioniert ähnlich wie das *Spatial Keyframing* Prinzip von Igarashi et al. (2005) (siehe Absatz 3.5, Seite 81). Die hier eingesetzte Morph-Map enthält neun Schlüsselpunkte, die über ein Quadrat verteilt wurden. Sie liegen im Zentrum, in den vier Ecken sowie auf den vier Zwischenpunkten zwischen den Eckpunkten. Jeder Schlüsselpunkt ist mit einer Schlüsselposition, einer konkreten Handform, verbunden. Abbildung 4.10a zeigt die eingesetzten Handformen. In der Kontrollfläche selbst wurden die Abbildungen nicht

angezeigt; nur ihre Namen wurden eingeblendet (siehe Abbildung 4.5). Beim Berühren eines Schlüsselpunktes wird die entsprechende Handform ausgewählt. Bewegt man sich zwischen diesen Handformen, wird eine neue Handform durch Interpolation generiert. Durch Berühren eines beliebigen Punktes P innerhalb des Quadrates, wird das Dreieck, das P beinhaltet berechnet und so die entsprechende Handform interpoliert (siehe Abbildung 4.10b).

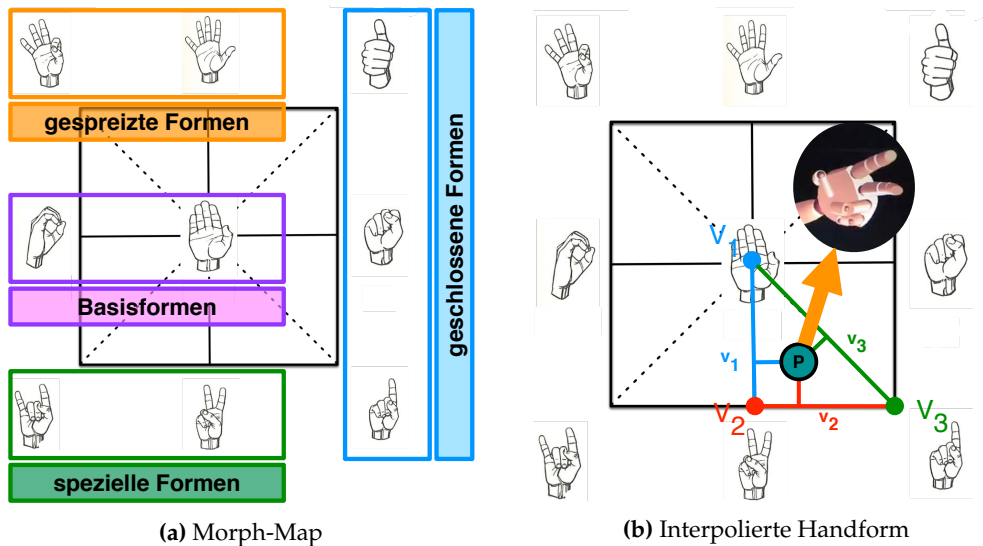


Abbildung 4.10.: Morph-Map mit den Handformen und Schematische Darstellung der Interpolationsfunktion sowie interpolierte Handform. Anordnung der verwendeten Handformen innerhalb Kategorien auf der Morph-Map (a). Schematische Darstellung der Interpolationsfunktion und interpolierte Handform (b). Berührungspunkt P legt die drei Kanten (v_1, v_2, v_3) fest, die zur Bestimmung der interpolierten Handform verwendet werden.

Die Interpolation wird zwischen den drei Kanten v_1, v_2 und v_3 des jeweiligen Dreiecks berechnet. Die Gewichtung der Kanten für die Interpolation wurde mit folgender Formel berechnet:

$$w_i = \tilde{n} \left(1 - \frac{d(P, v_i)}{\sum_{k=1}^3 d(P, v_k)} \right) \quad (4.1)$$

d ist dabei der euklidische Abstand und \tilde{n} ein Normalisierungsfaktor für w_i . Mit der Morph-Map kann eine Vielzahl der möglichen Handformen abgebildet und auf einen zweidimensionalen Raum projiziert werden. Es ist jedoch nicht möglich, alle Handformen und Zwischenübergänge anzubieten.

Die Anordnung der Handformen entstand im Zuge eines längeren Prozesses, in dem verschiedene Aspekte gegeneinander abgewogen wurden. Die Anordnung sollte für die Benutzer leicht erlernbar und die häufig genutzten Handformen leicht erreichbar sein. Darüber hinaus sollten die Übergänge zwischen den benachbarten Handformen natürlich aussehen, um sie technisch flüssig animieren zu können. Die finale Anordnung der Handformen ist ein Kompromiss zwischen benutzerfreundlichem Design und Berücksichtigung technischer Aspekte. Die offene Hand wurde im Zentrum platziert, da sie die am meisten genutzte Handform ist und sich zudem am besten als Übergangshandform für alle anderen

Handformen eignet. Eine Systematik unterstützt die Benutzer dabei, sich die Positionen der Handformen besser merken zu können. So zeigt die erste Zeile bekannte Handformen mit gespreizten Fingern. Die zweite Zeile beinhaltet Handformen mit geschlossenen Fingern. In der untersten Zeile wurden unkonventionelle bzw. symbolische Handformen wie das *Victory-Zeichen* abgelegt. Diese Handformen wurden so um das Zentrum herum angeordnet, dass die Interpolationen der Zwischenposen natürliche Handformen darstellen.

Maus-Interface

Um das Multitouch-Interface zu evaluieren, wurde es mit einem Maus-Interface als Kontrollbedingung verglichen. Dieses Interface bestand aus einer Maus und einer Mac-Tastatur. Um einen fairen Vergleich zu garantieren, wurde beim Entwurf des Maus-Interface auf die Schnelligkeit und Einfachheit der Maussteuerung geachtet. Durch ein Klicken der linken Maustaste wurde die Puppenhand an die Mausbewegungen gekoppelt, d. h. jede Mausbewegung wurde erst nach dieser Koppelung mit Bewegungen der Puppenhand in der x - y -Ebene verbunden. Ein zweiter Mausklick entkoppelte die Verbindung wieder. Während der Koppelung konnte die Hand mithilfe des Mousrades in der z -Achse (Tiefe) bewegt werden (siehe Diagramm in Abbildung 4.11). Die Veränderung des Arm-Swivel wurde durch ein gleichzeitiges Betätigen der *CMD*-Taste mit dem Mousrad möglich. Bei gedrückter *alt*-Taste und dem Mousrad wurde die Hand rotiert. Durch diese Trennung konnten die Aktionen nicht parallel, sondern nur sequentiell ausgeführt werden.

Trotz der klaren Trennung von Mausposition und Mousrad als Steuerelemente, kann die Maus aufgrund der weiten Verbreitung und hohen Vertrautheit als Referenzinterface verwendet werden (Benko et al., 2010). Auch das Umschalten zwischen den Funktionen mittels Funktionstasten ist eine gängige Technik bei Maus-Interfaces. Beispielsweise wird das Zoomen bei Grafikprogrammen ebenfalls mithilfe des Mousrades und Zusatztasten durchgeführt. Daher ist davon auszugehen, dass diese Vorgehensweise den Versuchspersonen bereits allgemein vertraut ist.

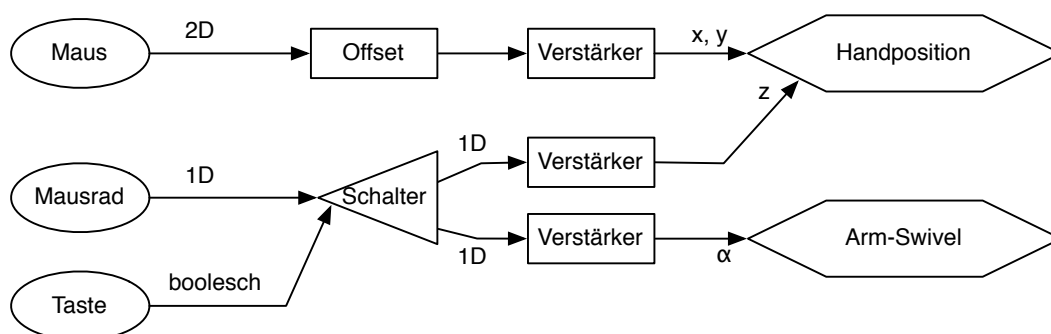


Abbildung 4.11.: Logikdiagramm der Maussteuerung. Aufgrund des Schalters für z -Position der Hand und Arm-Swivel können diese Aktionen nur sequentiell ausgeführt werden.

4.2.5. Versuchspersonen

Sechs deutschsprachige Versuchspersonen (3 w, 3 m) im Alter zwischen 21 und 30 Jahren nahmen an dieser Studie teil, die sich über sieben Sitzungen erstreckte. Fünf der Versuchspersonen hatten keinerlei Vorerfahrungen mit Multitouch, eine Versuchsperson gab an, Multitouch zwar bereits ausprobiert zu haben, aber dies nicht regelmäßig verwenden würde. Alle Teilnehmer wurden gebeten, während der Laufzeit der Studie möglichst keine Multitouch-Geräte zu verwenden. Jeder Teilnehmer erhielt für die Teilnahme eine Aufwandsentschädigung von 50 €, d. h. ca. 7 € pro Sitzung.

4.2.6. Ausrüstung und Material

Ausrüstung

Verwendet wurde ein 15.4 Zoll Multitouch-Display von Stantum, das in einem Winkel von ungefähr 45° vor den Teilnehmern platziert wurde. Das Multitouch-Display hatte eine Bildauflösung von 1280 × 800 Pixel und eine Berührungsgenauigkeit von < 4 Pixel (< 0.5 mm). Es wurde über ein USB-Kabel mit einem iMac verbunden, auf dem sowohl die Treiber als auch die Evaluationsanwendung liefen. Die komplette Software wurde in Java und Java3D implementiert.

Material

Posen und Pfade Die Posen für Aufgabe 1 wurden manuell erstellt. Die eine Hälfte der Posen wurde mit dem Maus-Interface erstellt; die andere Hälfte mit dem Multitouch-Interface. Um die Lösbarkeit der Posen sowohl mit Maus-Interface als auch mit Multitouch-Interface sicherzustellen, wurde im Anschluss an die Generierung die Erreichbarkeit jeder Pose sowohl mit dem Maus- als auch mit dem Multitouch-Interface getestet. Konnte eine Pose durch eines der beiden Interfaces nicht erreicht werden, wurde sie durch eine neu generierte ersetzt.

Die für Aufgabe 2 verwendeten Pfade wurden aus aufgezeichneten Motion-Capture-Daten von menschlichen Bewegungen extrahiert, um natürliche Bewegungen sicherzustellen. Diese können auch als potenzielle Bewegungen gesehen werden, die mit einer Character-Animation hätten erzeugt werden können.

Neues Koordinationsmaß Die größte Stärke des Multitouch-Interface liegt in der gleichzeitigen Kontrolle von mehreren DoF über Steuerelemente. Hier stellt sich die Frage, ob diese Steuerelemente auch tatsächlich gleichzeitig verwendet werden und wie koordiniert dies erfolgt. Ein Koordinationsmaß könnte helfen folgende zwei Fragen zu klären:

1. Welches Interface (Maus/Multitouch) bietet eine höhere Koordination?
2. Erhöht sich die Koordination des Multitouch-Interface bei Aufgabe 3 über die Zeit?

Ein solches Koordinationsmaß ermöglicht zudem nicht nur die Beobachtung von Koordination, sondern auch den Vergleich von verschiedenen Interface und Interaktionstechniken.

Es gibt verschiedene Ansätze zur Berechnung von Koordination. Die hier verwendete Definition von Koordination besagt, dass eine Bewegung als perfekt koordiniert bewertet wird, wenn der Benutzer sich in allen Ebenen gleichzeitig und mit gleicher Distanz bewegt. Diese Definition deckt sich am ehesten mit dem Konzept von Jacob et al. (1994). Deren Konzept hat jedoch einen Nachteil: Das entscheidende Kriterium ist nur, ob eine Bewegung in allen drei Achsen stattgefunden hat. Es wird nicht berücksichtigt, ob das Ausmaß der Bewegungen auf den einzelnen Achsen in einem angemessenen Verhältnis zueinander steht. Werden große Bewegungen in der x-y-Ebene ausgeführt, jedoch nur absolut minimale in der z-Achse, wird eine Bewegung als koordiniert bewertet. Allerdings sähe eine solche Bewegung unnatürlich aus.

Um diesen Nachteil auszugleichen, wird im Folgenden ein neues Koordinationsmaß vorgestellt. Für jede Dimension, z. B. x-y-Ebene oder z-Ebene, wird die Wegstrecke aufsummiert, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls Δt zurückgelegt wird. Die endgültige Koordination wird durch die Aufteilung der zu untersuchenden Bewegung in N Intervalle der Größe Δt berechnet. Technisch gesehen ist es sinnvoll, Δt als Vielfaches der *Bildfrequenz* (*Frame-Rate*) zu wählen. In dieser Studie betrug der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern (*Frames*) 40 ms. Somit war das hier gewählte Δt ebenfalls 40 ms.

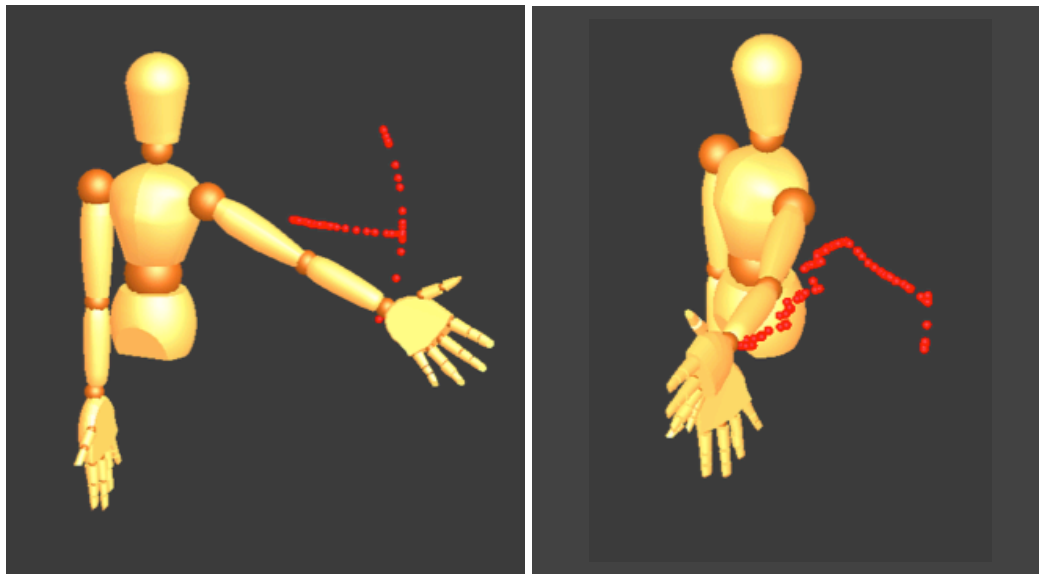
Im ersten Schritt wird für jedes Intervall die Koordination $C_{\Delta t}^i$ mit $i \in \{0, \dots, N-1\}$ berechnet. $C_{\Delta t}^i$ gibt demnach die Koordination innerhalb des Intervalls i an. Um $C_{\Delta t}^i$ zu berechnen, werden zunächst die Wegstrecken innerhalb der x-y-Ebene (d_{xy}) sowie in der z-Achse (d_z) zwischen den Frames i und $i-1$ berechnet. $C_{\Delta t}^i$ definiert sich dann über den Quotienten der Minima und Maxima beider Werte:

$$C_{\Delta t}^i = \frac{\min(d_{xy}, d_z)}{\max(d_{xy}, d_z)}. \quad (4.2)$$

Der Wert für $C_{\Delta t}^i$ liegt somit zwischen 0 und 1, wobei 0 bedeutet, dass die Bewegung sich innerhalb dieses Intervalls nur in einer Dimension abgespielt hat. 1 zeigt eine Bewegung in exakt beiden Dimensionen. Mithilfe der Teilkoordinationen wird die Gesamtkoordination $C_{\Delta t}$ definiert als:

$$C_{\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C_{\Delta t}^k \quad (4.3)$$

Auch der Wert der Gesamtkoordination liegt zwischen 0 (keine Koordination) und 1 (perfekte Koordination). Abbildung 4.12 zeigt jeweils ein Beispiel für eine Bewegung mit einer niedrigen und hohen Koordination. Dabei ist zu beachten, dass bei großem Δt der Quotient aus Gleichung 4.3 aufgrund des größer werdenden Abstandes zwischen $\min(d_{xy}, d_z)$ und $\max(d_{xy}, d_z)$ gegen 0 konvergiert. Aus diesem Grund sollte ein möglichst kleines Δt gewählt werden. Zusätzlich mussten die großen Sprünge, die durch die absolute Positionierung entstanden sind, herausgefiltert werden. Dazu wurde jeder Frame k , dessen $d_{xy}(k)$ oder $d_z(k)$ um 1.5 mal höher war als die entsprechende Standardabweichung, herausgenommen.



(a) Niedrige Koordination

(b) Hohe Koordination

Abbildung 4.12.: Beispiele für die Koordination von Bewegungen. Die roten Kugeln markieren den bewegten Pfad. (a) Bei einer Bewegung mit niedriger Koordination ($C = 0.01$) ist zu erkennen, dass diese getrennt und ausschließlich auf der x-y-Ebene stattgefunden hat. (b) Bei einer Bewegung mit hoher Koordination ($C = 0.14$) wird der Arm hingegen über mehrere Achsen hinweg diagonal nach vorne bewegt.

4.2.7. Versuchsplan

Als Design wurde ein *Within-Subject-Design* mit zwei unabhängigen Variablen gewählt:

1. Eingabegerät (Maus und Tastatur, Multitouch-Display)
2. Konfiguration

Bei Aufgabe 1 und Aufgabe 2 mussten jeweils 10 Posen bzw. 10 Pfade pro Sitzung gelöst werden. Jede Pose bzw. jeder Pfad wurde in einem Trial durchgeführt. Für jeden Trial wurde die Ausführungszeit gemessen. In Sitzung 7 wurden alle Bewegungspfade für Aufgabe 1 und Aufgabe 2 aufgezeichnet. Bei sieben Sitzungen und zwei Interfaces waren es demnach jeweils 140 Posen und Pfade in ebensovielen Trials. Diese wurden randomisiert und in 14 feste Sets aufgeteilt. Die Sets wurden dann Maus und Multitouch ausbalanciert zugewiesen. Analysiert wurden demnach 1680 (2×840) Datensätze:

Posenerstellung	Pfadverfolgung
× 6 Versuchspersonen	6 Versuchspersonen
× 7 Sitzungen	× 7 Sitzungen
× 2 Interfaces	× 2 Interfaces
× 10 Trials pro Interface	× 10 Trials pro Interface
= 840 Datensätze	= 840 Datensätze

Als abhängige Variable wurden folgende Werte gemessen:

1. Ausführungszeit
2. Koordination

4.2.8. Durchführung

Während der Designphase des Multitouch-Interface wurden mehrere Pilotstudien durchgeführt. In diesen Studien übertraf das Maus-Interface in der Regel das Multitouch in Bezug auf die Performanz. Bei der subjektiven Präferenz wurde es – insbesondere in den ersten Sitzungen – ebenfalls bevorzugt. Dieser Umstand könnte auf die höhere Vertrautheit im Umgang mit der Maus zurückzuführen sein. Interessanterweise näherte sich jedoch die Performanz der beiden Interfaces nach mehreren Sitzungen an. Diese Beobachtung führte dazu, dass sich die finale Studie ebenfalls über mehrere Sitzungen mit Wiederholungen der Aufgaben und der Interaktionen erstreckte.

Die Studie erstreckte sich daher über sieben Sitzungen, die auf drei Wochen verteilt wurden. Dadurch sollte den Benutzern die Möglichkeit gegeben werden, das neue Interface kennenzulernen und ein Gefühl dafür zu entwickeln. Die Einsatzzeiten der Versuchspersonen wurden so organisiert, dass zwischen den Sitzungen immer eine Pause von 1–2 Tagen bestand. Mit Ausnahme der siebten Sitzung, die 5–9 Tage nach der sechsten Sitzung stattfand. Der größere Abstand von dieser zur letzten Sitzung sollte zeigen, wie robust die entwickelten Fertigkeiten am neuen Interface sind. In der abschließenden siebten Sitzung wurden die Bewegungen der Puppe aufgezeichnet und dazu verwendet, die Koordination zu berechnen. Abbildung 4.13 illustriert die Zeitplanung der Aufgaben.

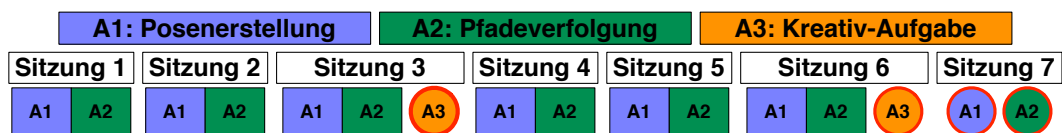


Abbildung 4.13.: Aufgabenplanung. Aufgabe 1 und 2 wurden in jeder Sitzung durchgeführt. In Sitzung 3 und 6 kam Aufgabe 3 hinzu. Aufgaben die für die Koordinationsmessung aufgezeichnet wurden sind rot markiert.

In jeder Sitzung führten die Versuchspersonen zwei Aufgaben jeweils mit Maus- und Multitouch-Interface aus. Jede Versuchsperson fing mit dem Maus-Interface an und wechselte anschließend zum Multitouch-Interface. Um einen Reihenfolgen-Effekt zu vermeiden, wurden die Sets der Konfigurationen über die beiden Interfaces ausbalanciert.

Bevor die Versuchspersonen mit Aufgabe 1 starteten, wurde jedes Mal zunächst eine Trainingsphase mit einem Trainingssatz durchlaufen. Dieses Training war systematisch aufgebaut, um aufeinanderfolgende Bewegungen sowohl in der x-y-Ebene als auch in der z-Achse zu üben. In den ersten Trainingstrials wurden nur Konfigurationen gezeigt, die durch Bewegen des Arms in der x-y-Ebene gelöst werden konnten. Alle anderen Steuerelemente wurden vorerst gesperrt. In dem zweiten Teil der Trainingsphase kamen Bewegungen in

der z-Achse hinzu. Anschließend wurden Konfigurationen durchlaufen, die nur durch Veränderung des Arm-Swivel gelöst werden konnten. Der dritte Teil der Trainingsphase enthielt Konfigurationen mit Veränderungen aller DoF (x-y-z und Arm-Swivel). Als letzter Trainingsschritt wurden volle Bewegungen im 3D-Raum geübt. Ein ähnliches Training erfolgte auch vor Aufgabe 2.

Unmittelbar nach jeder Aufgabe wurde ein Fragebogen, ausgegeben, den die Versuchspersonen ausfüllen mussten. Dieser enthielt Vergleichsfragen zu den beiden Interfaces. Die insgesamt 16 Fragen zielten auf die Benutzbarkeit und Benutzererfahrung wie Nützlichkeit, Zufriedenheit, Empfehlung, Bevorzugung und gefühlte Schnelligkeit. In einer fünffach abgestuften Skala sollten sich die Versuchspersonen jeweils für ein Interface entscheiden. Die beiden Endpunkte markierten Maus und Multitouch, während die mittlere Position mit „beide gleich“ beschriftet wurde.

In Sitzung drei und sechs wurde zusätzlich noch eine Kreativ-Aufgabe gestellt, bei der die Versuchspersonen Bewegungsanimationen in Echtzeit zu Audiodateien erstellen sollten. Dass diese Aufgabe erst bei der dritten Sitzung gestellt wurde, war eine bewusste Entscheidung. Es sollte zunächst sichergestellt werden, dass das Multitouch-Interface von den Versuchspersonen bis zu einem gewissen Grad beherrscht wurde, bevor sie das komplette Multitouch-Interface inklusive der Steuerung für die Handformen (Morph-Map) erstmals sahen. Deshalb erhielten die Versuchspersonen jeweils vor dieser Aufgabe die Möglichkeit, das gesamte Spektrum des Interface zwei Minuten lang zu testen. Anschließend durften sich die Versuchspersonen jede Audiodatei bis zu zweimal anhören. Dabei sollten sie sich die ersten *Choreographien* überlegen und hatten die Möglichkeit diese auch gleichzeitig proben. Erst dann begannen die Aufnahmen der Animation. Für jede Audiodatei hatten die Versuchspersonen zwei Aufnahmeversuche. Im Anschluss daran füllten die Versuchspersonen einen weiteren Fragebogen aus. Dabei sollten sie Angaben dazu machen, wie nützlich sie das Multitouch für diese Kreativ-Aufgabe einstufen.

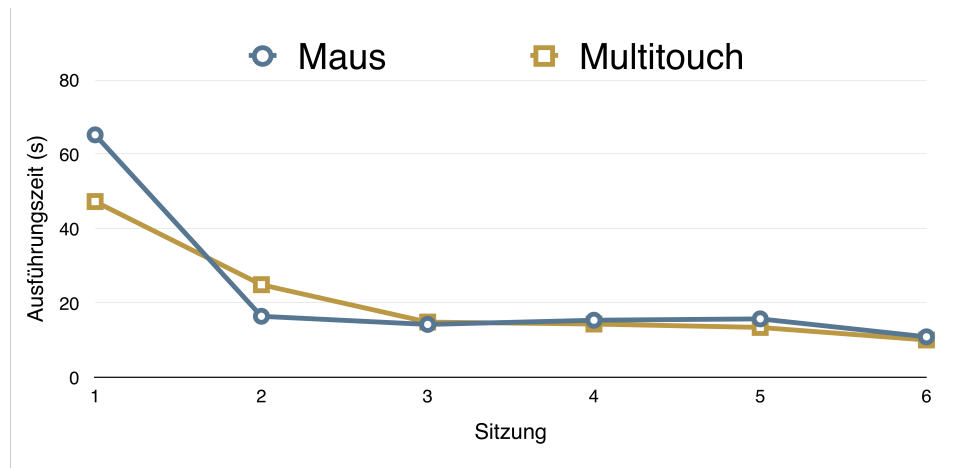
Nachdem die Versuchspersonen die gesamte Studie absolviert hatten, wurden sie in einem strukturierten Interview zu den beiden Interfaces befragt. Die vollständigen Fragebögen und Fragen des Abschlussinterviews finden sich im Anhang A.

4.3. Ergebnisse

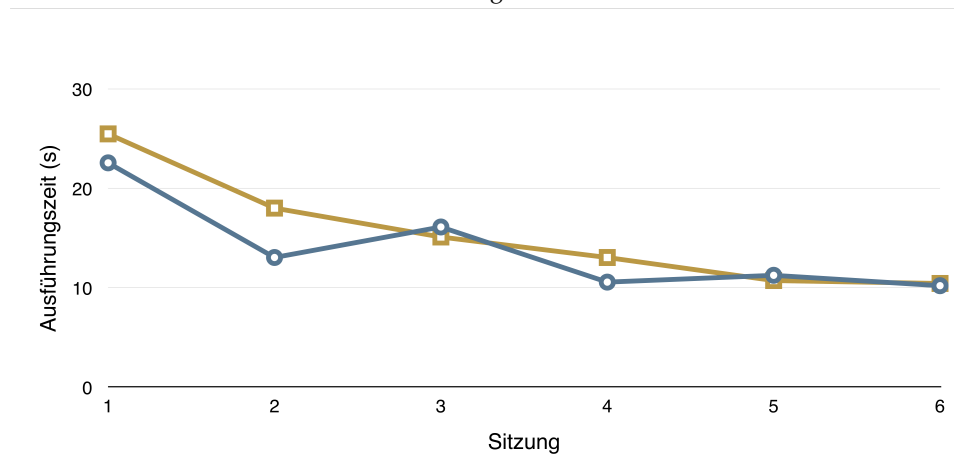
4.3.1. Effizienz

Zur Beurteilung der Effizienz von Maus- und Multitouch-Interface wurden die jeweils gemessenen Ausführungszeiten miteinander verglichen. Grundlage waren die Ausführungszeiten aus den Sitzungen 1 bis 6. Sitzung 7 wurde bewusst nicht in die Berechnung einbezogen, da sie nur der Überprüfung der Koordination diene. Ein *Wilcoxon Test* zeigt für beide Aufgaben keinen signifikanten Unterschied. Abbildung 4.14 bildet die durchschnittliche Durchführungszeit für Aufgaben 1 und 2 ab. Am Verlauf der Kurve ist zu erkennen,

dass sich die Ausführungszeiten innerhalb der ersten drei Sitzungen verbessern und sich danach ein Trend zum Konvergieren gegen eine gemeinsame Asymptote andeutet.



(a) Aufgabe 1



(b) Aufgabe 2

Abbildung 4.14.: Durchschnittliche Ausführungszeiten für Aufgabe 1 und 2. Die Zeiten wurden über alle Versuchspersonen, Trials und sechs Sitzungen gemittelt.

4.3.2. Koordination

Koordinationsmaß Wie in Absatz 4.2.6 (Seite 101) beschrieben, bezieht sich das vorliegende Koordinationsmaß auf eine koordinierte Ausführung der Armbewegungen der 3D-Puppe. Es macht keine Aussagen über die Koordination der Fingerbewegungen der Versuchspersonen. Es wurden nur die Bewegungspfade aus der siebten Sitzung zur Berechnung der Koordination C verwendet, da die maximale Koordination innerhalb der Aufgaben erst nach Aufbau einer gewissen Routine zu erwarten ist. In Abbildung 4.15 sind die durchschnittlichen Werte des Koordinationsmaßes für Maus- und Multitouch-Interface abgebildet.

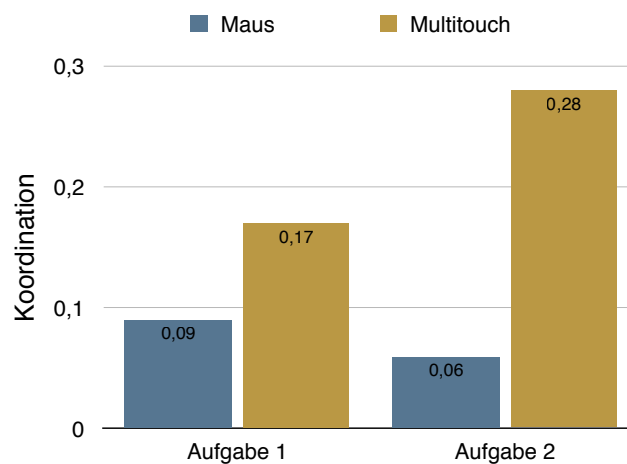


Abbildung 4.15.: Auswertung der Koordination. Das Multitouch (gelb) zeigt für Aufgabe 1 und Aufgabe 2 eine signifikant höhere Koordination als die Maus (blau).

Ein zweiseitiger *Wilcoxon Test* zeigt eine signifikant höhere Koordination bei den Pfaden mit Multitouch. In Aufgabe 1 liegt die Koordination mit dem Multitouch-Interface bei einem Wert von 0.17; die des Maus-Interface liegt bei 0.09 ($z = 2.20, p < .05$). Bei Aufgabe 2 lag der Wert für die berechnete Koordination für das Multitouch-Interface bei 0.28 und bei Maus-Interface 0.06 ($z = 2.20, p < .05$).

Der Vergleich der Koordination bei der Kreativ-Aufgabe (Aufgabe 3) basiert auf den Werten von Sitzung 3 und Sitzung 6, um eine Gewöhnung der Versuchspersonen im Umgang mit dem Multitouch-Interface zu gewährleisten. Es zeigt sich ein Anstieg von 0.19 auf 0.22. Ein zweiseitiger *Wilcoxon Test* stellt keine Signifikanz fest ($z = 0.73; p = 0.46$).

Allgemeine Beobachtung Aufgrund der begrenzten DoF der Maus musste die Veränderung der Tiefe mit dem Scrollrad realisiert werden. Dies erschwerte die parallele Bewegung in allen Achsen, sodass beim Maus-Interface häufiger eine sequentielle Bedienung der DoF zu beobachten war. Obwohl diese Vorgehensweise auch mit Multitouch-Interface möglich gewesen wäre, bedienten die Versuchspersonen dabei die DoF parallel und nicht sequentiell.

Animationsbeobachtung Während der Ausführung der Kreativ-Aufgabe konnte Folgendes beobachtet werden: Die Versuchspersonen setzten alle Steuerelemente ein, die ihnen zur Verfügung standen. Der virtuelle Arm wurde in alle Richtungen, einschließlich der z-Richtung, bewegt. Um ein langsames Öffnen der Hand zu animieren, nutzten sie beispielsweise beide Hände zur Veränderung der Handform und der Handorientierung. Zusätzlich wurden Tempo und Dynamik der Bewegungen variiert, sodass in allen Videos das Tempo der Musik und des Sprechers klar wiederzuerkennen ist. Zudem konnten Korrekturen und Unterbrechungen bei der Bewegungsausführung beobachtet werden.

Abbildung 4.16 zeigt Sequenzen von zwei aufgenommenen Animationen, die zwei unterschiedliche Audiodateien begleiten⁶. Die oberen Sequenzen stammen aus der Animation für die langsame und romantische Pop Ballade M2. Beachtenswert ist dabei die sukzessive Öffnung der Hand, um die Textstelle „...near, far ...“ zu betonen. Die unteren Bilder zeigen Ausschnitte aus den Gesprächsaufnahmen der weiblichen Sprecherin S2. Der Ausschnitt zeigt die begleitende Bewegung zum gesprochenen Satz: „... drinking Gin at 9 o'clock ...“, der weiblichen Sprecherin S2. Es ist zu sehen, wie die Animation passend dazu eine Bewegung zum Kopf macht und gleichzeitig eine Handform wählt, die das Halten eines Glases darstellt.

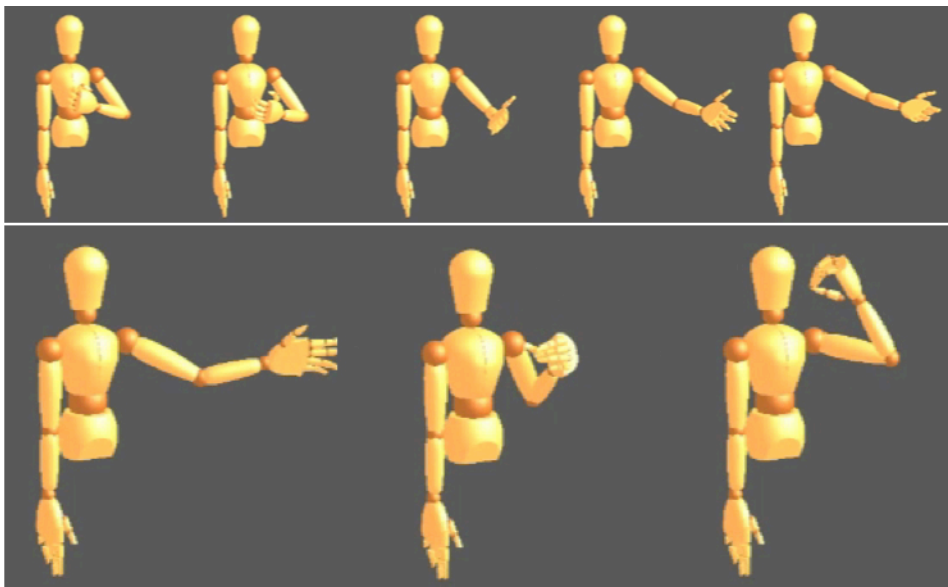


Abbildung 4.16.: Ausschnitt einer Animation aus der Kreativ-Aufgabe. Die obere Reihe zeigt Bewegungen für die langsame Pop Ballade M2. Die untere Bildreihe zeigt die begleitende Bewegung zum gesprochenen Satz: „... drinking Gin at 9 o'clock ...“, der weiblichen Sprecherin S2.

⁶Ausschnitte aus den hier genannten Animationen können am Ende des Präsentationsvideos unter <https://vimeo.com/28926436> angeschaut werden.

4.3.3. Fragebogen und Interviews

Fragebogen Zur Analyse der Fragebögen wurde die Skala in ein Intervall von -2 für das Maus- und $+2$ für das Multitouch-Interface transformiert. Anschließend wurden die Bewertungen für jede Frage über alle Versuchspersonen, Sitzungen und Aufgaben aufsummiert. Letzteres war möglich, da die Antworttendenzen der Versuchspersonen für beide Aufgaben ähnlich waren. Ein *Chi Quadrat Test* verglich die Bewertungen gegen den erwarteten neutralen Wert 0. Das Alpha-Niveau wurde mit der *Bonferroni-Korrektur* auf 0.003 korrigiert. In Tabelle 4.1 sind die signifikanten Fragen aufgelistet. Alle signifikanten Fragen wurden in Richtung Multitouch-Interface beantwortet. Die Antworten der restlichen Fragen zeigten keine signifikanten Tendenzen.

	<i>M</i>	χ^2	<i>p</i> -Wert
Welches der Eingabegeräte war nützlicher?	0.43	19.64	<0.003
Welches der Eingabegeräte ermöglichte ein schnelleres Lösen der Aufgabe?	0.62	35.93	<0.001
Mit welchem Gerät waren Sie zufriedener?	0.43	23.00	<0.001
Welches Gerät würden Sie anderen empfehlen?	0.62	32.07	<0.001
Welches Gerät machte mehr Spaß?	1.13	67.89	<0.001
Welches Gerät finden Sie besser?	0.75	45.82	<0.001

Tabelle 4.1.: Signifikanten Ergebnisse der Fragebögen. Die hier gelisteten Fragen waren signifikant und wurden zugunsten des Multitouch-Interface beantwortet. Die restlichen Fragen zeigten keine Signifikanzen.

Interviews In den Interviews berichteten die Versuchspersonen, dass sie das Multitouch-Interface in der ersten Sitzung als sehr schwer empfanden. Bereits in der zweiten Sitzung änderte sich dies jedoch: Die Versuchspersonen fühlten sich „viel wohler“ und hatten die „Angst“ vor dem Multitouch verloren. Auch spielte das zuerst bestehende Problem beim Sehen und Verstehen der 3D-Szene bereits nach einer Sitzung keine Rolle mehr. Darüber hinaus zeigte sich, dass diejenigen, die das Multitouch bevorzugten, es auch als „sexier“ und „intuitiver“ bezeichneten.

4.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse zu Posenerstellung und Pfadverfolgung gewonnen werden: Beim Vergleich von Multitouch-Interface und Maus-Interface kann für keine der beiden Aufgaben ein signifikanter Unterschied in den Ausführungszeiten festgestellt werden. Somit sind beide Interfaces gleich effizient. Das neu entwickelte Maß zur quantitativen Bewertung von Koordination zeigt, dass das Multitouch-Interface gegenüber dem Maus-Interface jedoch eine signifikant höhere Koordination der Bewegung aufweist. Die Versuchspersonen bevorzugten das Multitouch-Interface gegenüber dem Maus-Interface und empfinden die Aufgaben damit zudem als schneller lösbar. Für die Kreativ-Aufgabe können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden: Das komplexe Interface lässt sich

beidhändig mit einem hohen Maß an Koordination bedienen. Die Versuchspersonen nutzen dabei die Möglichkeit des Multitouch-Interface, mehrere Freiheitsgrade parallel zu steuern: Handposition, Arm-Swivel, Handorientierung und Handform werden gleichzeitig verändert. Die Versuchspersonen zeigen eine sehr gute Leistung bei der Echtzeit-Animation sowohl zur Untermalung von Musikstücken als auch von Sprachdateien. Die Koordination bei dieser Kreativ-Aufgabe konnte von Sitzung 3 zu Sitzung 6 zwar gesteigert werden, jedoch konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Messzeitpunkten festgestellt werden.

4.4. Diskussion

Diese Erkenntnisse lassen sich folgendermaßen in den bisherigen Forschungskontext integrieren:

Die Bevorzugung des Multitouch-Interface und das subjektive Empfinden der Versuchspersonen damit schneller zu sein, bestätigen, dass auch unerfahrene Multitouch-Nutzer in der Lage sind, mehrere DoF zu kontrollieren. Somit kann *Hypothese H1* angenommen werden. Die Koordination von animierten Bewegungen wird hier erstmals anhand einer skelettbasierten Animation überprüft. Dies setzt eine Steuerung mehrerer DoF voraus. Andere Arbeiten zur Performance-Animation setzten in der Regel auf andere Hardware. Dazu gehören Motion-Capture (Dontcheva et al., 2003), selbst verbaute Sensoren (Oore et al., 2002) oder softwaretechnische Lösungen mit einer Übertragung auf die Maus (Igarashi et al., 2005; Neff et al., 2007). Lösungen, die ebenfalls Multitouch-Displays für die Performance-Animation einsetzen (Achibet et al., 2015; Walther-Franks und Malaka, 2014) ermöglichen zwar die Veränderung mehrerer DoF, jedoch keine Animation in Echtzeit. Da geht es lediglich über Keyframe-Animation, d. h. die Erstellung von Einzelposen.

Zusätzlich zeigt das vorliegende Ergebnis, dass die Verwendung von Multi-Finger auch bei komplexen Aufgaben möglich ist. Bisherige Studien setzten Multi-Finger-Interfaces entweder für einfachere Interaktionen wie 3D-Selektion (Benko und Feiner, 2007) oder allein für die Codierung von Gesten ein (Wu und Balakrishnan, 2003). Schwierigere Interaktionen wie die Translation, Rotation und Skalierung von 3D-Objekten setzen Multi-Finger-Multitouch nur für maximal sechs DoF ein (Hancock et al., 2009; Martinet et al., 2010; Reisman et al., 2009). Durch die beidhändige Bedienung konnte in der hier durchgeführten Studie gezeigt werden, dass Benutzer sogar acht DoF koordiniert kontrollieren können.

Es ist anzumerken, dass die Kontrolle von mehr als acht DoF für ungeübte Versuchspersonen schwierig zu sein scheint. Sie sind offenbar nicht ohne Weiteres in der Lage, Daumen, Zeige- und Mittelfinger gleichzeitig und unabhängig voneinander sowie kontrolliert zu bewegen. Dafür spricht das Scheitern der 3-Finger-Steuerung des 3D-Arms in der Vorstudie. Dies bestätigt Teile der Ergebnisse von Kin et al. (2009), die sich in einer Grundsatzstudie mit dem Einsatz mehrerer Finger bei Selektionsaufgaben befassten. Darin konnte zwar gezeigt werden, dass überwiegend Zeige- und Mittelfinger bevorzugt werden, der Einsatz von mehr als zwei Fingern gleichzeitig jedoch sowohl die Ausführungszeit als auch die Fehlerquote erhöht. Die Vorstudien zeigten, dass die Verwendung von mehr als zwei Fingern, insbe-

sondere bei komplexen Aufgaben zu massiven Problemen führt. Dies legt nahe, dass bei Multitouch-Interfaces – insbesondere wenn sie zur Lösung komplexer Aufgaben vorgesehen sind – nicht mehr als zwei Finger jeder Hand eingesetzt werden sollten, damit eine sofortige und intuitive Bedienung möglich ist.

Für den Vergleich von Effizienz bzw. Performanz von Multitouch und Maus wurden im Gegensatz zu dieser Arbeit bisher überwiegend weniger komplexe Aufgaben wie Translation, Rotation und Selektion verwendet (Cockburn et al., 2012; Forlines et al., 2007). Arbeiten, die mehrere DoF untersuchten, konzentrierten sich u. a. nur auf den Vergleich von verschiedenen Mäusen mit mehreren DoF untereinander (Balakrishnan et al., 1997; Hinckley et al., 1999) oder zwischen Maus und anderen 6-DoF-Geräten wie 3D-Tracker (Bérard et al., 2009; Jacob et al., 1994). In der Regel werden in solchen Studien meist Matching- bzw. Docking-Aufgaben gestellt und überwiegend auch nur einfache geometrische Formen in 2D (Benko et al., 2010; Kruger et al., 2005; Pedersen und Hornbæk, 2012; Schmidt et al., 2009) oder 3D (Bérard et al., 2009; Hancock et al., 2007; Veit et al., 2009; Wang et al., 2011) verwendet. Die in dieser Arbeit vorgestellten Aufgaben erforderten erstmals die Veränderung von komplexen Strukturen in 3D. Posenerstellung entspricht im Prinzip einer Docking-Aufgabe, bei der jedoch mehrere Objekte gleichzeitig in Position gebracht werden müssen. Im Bereich Multitouch-Interaktionen sind die Untersuchungen für die Pfadaufgabe unterrepräsentiert, obwohl diese nach Foley et al. (1984) zu den elementaren Aufgaben gehören. Insbesondere in 3D stellt diese Aufgabe eine große Herausforderung dar. Diese Arbeit konnte mit Aufgabe 2 zeigen, dass die Pfadverfolgung auch im Kontext Multitouch sinnvoll untersucht werden kann. Sie bietet zudem die Möglichkeit, Koordination und Beherrschung des Interface genauer zu untersuchen.

Durch die Synchronisation der Bewegungen mit den Audiodateien wie bei der Kreativ-Aufgabe können Versuchspersonen gezwungen werden, getimte Bewegungen auszuführen. Durch zusätzliche Anforderungen wie eine geeignete Interpretation von Audiodateien kann zielgerichtetes Verhalten erzwungen werden. Werden getimte Bewegungen mit zielgerichteten Bewegungen wie Pfadverfolgung kombiniert, erhöht sich die Schwierigkeit der Aufgabe zusätzlich. Damit können Interfaces unter hoher Komplexität und Schwierigkeit getestet werden. Mit diesen drei vorgestellten Aufgaben können Interfaces auf komplexere Art und Weise als bisher getestet und evaluiert werden.

Diese Studie vergleicht erstmals systematisch und konsistent die Effizienz von Maus mit der Effizienz eines Multitouch-Display anhand der vorgestellten komplexen Aufgaben. Die Analysen zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Interfaces für die Aufgaben Posenerstellung und Pfadverfolgung. Damit konnte *Hypothese H2* nicht bestätigt werden, bei der eine bessere Performanz von Multitouch nach einer Eingewöhnungsphase erwartet wurde. Es könnte allerdings sein, dass dieser Effekt aufgetreten wäre, wenn die Versuchspersonen innerhalb der Studie die Möglichkeit gehabt hätten, intensiver und länger mit dem Multitouch-Interface zu arbeiten. Es wurde erwartet, dass die Maus am Anfang schneller ist als das Multitouch. Diese Annahme konnte nicht bestätigt werden, da Maus und Multitouch keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Ausführungszeit aufwiesen. Die fehlende Signifikanz in der Effizienz deutet darauf hin, dass Multitouch bei komplexen Aufgaben ohne Leistungseinbußen Maus und Tastatur ersetzen kann. Hiermit konnte

erstmalig gezeigt werden, dass Nutzer ohne Vorerfahrung sogar eine solch komplexe Aufgabe wie die Echtzeit-Animation bewältigen und dabei mehrere DoF gleichzeitig steuern können.

Die Verlaufskurve der Ausführungszeiten lässt einen starken Lerneffekt erkennen. Dieser zeigt sich bei Aufgabe 1 in den ersten drei, bei Aufgabe 2 in den ersten vier Sitzungen. Die Lernkurve zeigt, dass sich die Ausführungszeiten (Effizienz) des Multitouch nach einer kurzen Eingewöhnungsphase deutlich steigern. Der Verlauf der Lernkurve deckt sich mit den Aussagen der Versuchspersonen. Die meisten empfanden das Multitouch zu Beginn ungewohnt und schwierig. Diese Einschätzung änderte sich während der zweiten oder dritten Sitzung.

Die schnelle Konvergenz der Ausführungszeiten bei Posenerstellung und Pfadverfolgung spricht dafür, dass sich diese Aufgaben einfach mit dem Multitouch-Interface lösen lassen und die Versuchspersonen relativ schnell souverän damit umgehen können. Dies deutet darauf hin, dass das Interface-Design den gewünschten Anforderungen entspricht: Mit der Möglichkeit, mehrere DoF gleichzeitig zu steuern, ist das Interface zwar komplex, jedoch dennoch einfach zu erlernen.

Innerhalb der hier durchgeführten sechs Sitzungen konnte kein Unterschied in der Effizienz von Maus und Multitouch festgestellt werden. Eine längere Phase der Gewöhnung bzw. des Trainings könnte möglicherweise zeigen, ob das Multitouch-Interface effizienter als die Maus werden kann. Dies schafft eine vergleichbare Vertrautheit zur Maus. Insbesondere bei Versuchspersonen, die weder Vorerfahrung mit dem Multitouch, noch mit Animationen besitzen, ist ein Vergleich der Effizienz von Maus und Multitouch in diesem Kontext schwierig. Aus diesem Grund wäre es für zukünftige Arbeiten interessant, Experten wie z. B. professionelle Animationskünstler mit dem hier vorgestellten Interface arbeiten zu lassen und deren Startperformanz und Lernkurve mit denen unerfahrener Benutzer zu vergleichen.

Neuere Arbeiten zu Interaktionstechniken fokussieren auf deren Effizienz, um sie mit anderen Eingabegeräten (Benko und Feiner, 2007; Fares et al., 2013; Tubb und Dixon, 2015) oder anderen Interaktionstechniken bzw. deren Abwandlungen (Arif et al., 2014; Avery et al., 2014; Hancock et al., 2007; Martinet et al., 2010; Olwal et al., 2008; Veit et al., 2009) zu vergleichen. Dabei wird jedoch die Untersuchung der Koordination vernachlässigt. Um die Koordination von unterschiedlichen Interaktionstechniken objektiv vergleichen zu können, sind quantitative Maße essentiell. Denn nach Zhai und Milgram (1998) ist nur durch die zusätzliche Betrachtung der Koordination ein tieferes Verständnis für Eingabegeräte und Interaktionstechniken möglich. Obwohl sich schon frühere Arbeiten mit der Koordination von Interaktionstechniken und deren Quantifizierung befassten (Balakrishnan und Hinckley, 2000; Jacob et al., 1994; Zhai und Milgram, 1998), widmen sich mittlerweile nur wenige aktuelle Studien der Untersuchung koordinierter Bewegungen (Stoelen und Akin, 2010; Zhao et al., 2015). Die in früheren Arbeiten vorgeschlagenen Koordinationsmaße eignen sich nicht optimal für die Beurteilung von freien Bewegungen. Sie benötigen entweder einen Vergleichspfad (Balakrishnan und Hinckley, 2000; Zhai und Milgram, 1998), die Zielkonfiguration (Stoelen und Akin, 2010) oder berücksichtigen nicht das Verhältnis zwischen den Bewegungen innerhalb der Achsen (Jacob et al., 1994). Da hier jedoch erstmals die

Koordination anhand freier Bewegungen untersucht wurden, musste ein entsprechend geeignetes quantitatives Koordinationsmaß entwickelt werden. Mit diesem Koordinationsmaß konnte quantitativ erfasst werden, dass die Steuerung mit dem Multitouch-Interface bei allen Aufgaben eine signifikant höhere Koordination aufwies als die Steuerung mit dem Maus-Interface. Das Koordinationsmaß zeigt einen klaren Vorteil des Multitouch in Bezug auf die parallele Steuerung der Dimensionen x-y-Ebene sowie der z-Achse. Dies wurde insbesondere bei Aufgabe 2, der Pfadverfolgung, deutlich. Das Aufgabendesign bei dieser Aufgabe sollte die Versuchspersonen explizit zwingen, flüssig und somit auch koordinierter zu arbeiten.

Fließende Bewegungen sind nur möglich, wenn sie gleichmäßig in allen Ebenen verlaufen. Das Maus-Interface ermöglicht nur eine sequentielle Steuerung des Arms. Es erreichte daher im Durchschnitt lediglich Koordinationswerte von 0.09 bei Aufgabe 1 bzw. 0.06 bei Aufgabe 2. Das Multitouch-Interface erreichte hingegen Werte von 0.17 und 0.28. Daher können für Bewegungen folgende Schwellenwerte definiert werden: Bewegungen die Koordinationswerte < 0.1 aufweisen können als wenig koordiniert betrachtet werden. Bewegungen mit Werten > 0.2 hingegen können als koordiniert bewertet werden. Demnach bildet das neuentwickelte Koordinationsmaß die parallele Nutzung mehrerer DoF sowohl mit Multitouch-Interface als auch mit Maus-Interface adäquat ab. Diese Schwellenwert sollten in späteren Studien noch einmal validiert werden. Damit kann *Hypothese H3* angenommen werden: Die Bewegungen mit dem Multitouch-Interface weisen eine höhere Koordination auf als die mit dem Maus-Interface.

In Bezug auf das hier vorgestellte Koordinationsmaß muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass es nicht allgemein gültig ist. Seine Stärken liegen in der Bewertung von freien Bewegungen. Denn es basiert auf einer Definition von Koordination, die sich an der natürlich aussehenden Bewegung ausrichtet. Damit Bewegungen natürlich aussehen, sollten sie sich möglichst in mehrere Dimensionen erstrecken, da sie ansonsten maschinenartig bzw. roboterähnlich wirken. Das Problem an der Ausrichtung auf natürlich fließende Bewegungen ist, dass zielgerichtete Bewegungen unter Umständen als unkoordiniert bewertet werden, sofern diese nur auf einer Achse oder innerhalb einer Ebene erfolgen. Sollte der direkte Weg zu einem Ziel allerdings genau dies beinhalten, beschreibt das vorgestellte Koordinationsmaß die Bewegung nicht angemessen. Eine Bewegung, die in jeder Dimension erfolgt, würde auch dann als hoch koordiniert eingestuft werden, wenn sie einen Umweg darstellt.

Es wurde angenommen, dass sich die Koordination mit dem Multitouch-Interface bei der Kreativ-Aufgabe über die Zeit verbessert (*Hypothese H4*.) Die Steigerung der Koordination bei der Kreativ-Aufgabe innerhalb von drei Sitzungen war jedoch nicht signifikant. Damit muss Hypothese H4 verworfen werden. Die steile Lernkurve, die nach der dritten Sitzung abflacht könnte ein Indiz dafür sein, dass die maximale Koordination mit diesem Zeitpunkt erreicht wurde. Eine Analyse des Unterschieds zwischen erster, zweiter und dritter Sitzung wäre aufschlussreich gewesen. Da die Pfade bei den Aufgaben 1 und 2 nur in Sitzung 7 aufgezeichnet wurden, war dies jedoch nicht möglich. Der Verlauf sollte deshalb in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Die Koordination von Bewegungen hängt in der Regel maßgeblich von bestimmten individuellen Gegebenheiten ab, wie der Erfahrung mit einer Bewegung, bestehenden motorischen Fähigkeiten und der motorischen Begabung (Latulipe, 2006, S.36). Veränderungen in den koordinativen Fähigkeiten setzen daher im Allgemeinen Übung voraus. Die fehlende Signifikanz bestätigt die Unerfahrenheit der Nutzer und könnte hier darauf zurückzuführen sein, dass eine Verbesserung der Koordination mehr Zeit und intensivere Übung erfordern könnte. Die Effekte koordinativen Lernens müssten mit einem speziell darauf ausgelegten Untersuchungsdesign überprüft werden. Dies könnte ebenfalls in weiteren Studien untersucht werden.

Die Versuchspersonen präferierten das Multitouch-Interface und empfanden dieses, trotz objektiver Gleichleistung, subjektiv als die schnellere Lösung. Dies kann als Indikator gesehen werden, dass die Arbeit mit dem Multitouch-Interface kurzweiliger ist bzw. mehr Spaß macht. Ein solch positives Nutzererlebnis (User Experience) ist nicht nur eine entscheidende Voraussetzung, um ein neues Eingabegerät langfristig zu etablieren, sondern ist immer auch ein Hinweis darauf, dass sich die Versuchspersonen dabei als kompetent erleben (Shneiderman, 1983).

Für die eingangs formulierten Forschungsfragen können aufgrund der Ergebnisse folgende Schlüsse gezogen werden:

F1: Sind unerfahrene Multitouch-Nutzer überhaupt in der Lage, gleichzeitig mehrere Freiheitsgrade mit den Fingern zu kontrollieren?

Die komplexen Aufgaben erforderten eine Multi-Finger-Koordination beider Hände, die zusammen acht DoF zur Verfügung stellten. Die objektiv gemessene Leistung bei der Nutzung des Multitouch-Display entspricht der Leistung des Maus-Interface. Der subjektiv empfundene Erfolg übertrifft die Bewertung des Maus-Interface. Beides belegt, dass unerfahrene Computernutzer durchaus in der Lage sind, mehrere DoF mit den Fingern zu kontrollieren.

F2: Erfolgt die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch koordiniert?

Die quantitative Bestimmung mit dem neuentwickelten Koordinationsmaß belegt, dass die koordinative Leistung mit dem Multitouch-Display und dem vorgestellten Interface im Vergleich zum Maus-Interface höher ist. Daran ist zu erkennen, dass unerfahrene Multitouch-Nutzer die Stärken und Vorteile von Multitouch bewusst einsetzen können und ein Multitouch-Display nicht einfach *mausäquivalent* verwenden.

F3: Verschlechtert sich die Effizienz durch die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch im Vergleich zu Maus und Tastatur?

Die Analyse der Ausführungszeiten zeigt, dass Multitouch- und Maus-Interface die gleiche Effizienz in den Vergleichsaufgaben aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass Multitouch bei

komplexen Aufgaben, die die Steuerung von mehreren DoF erfordern, ohne Leistungseinbußen die Maus ersetzen kann – sogar für Nutzer ohne jegliche Vorerfahrung.

4.5. Zusammenfassung

Für diese Studie wurde ein komplexes Multitouch-Interface zur interaktiven Steuerung eines menschlichen Arms entwickelt. Es verband bekannte Interaktionstechniken wie die *2-Punkt-RT*-Technik für Rotation oder die *Pinch*-Geste mit neuartigen Steuerelementen wie der Morph-Map und wurde bimanual bedient. Da Vorstudien zeigten, dass die Versuchspersonen große Schwierigkeiten damit hatten, mehr als zwei Finger pro Hand bei der Bedienung einzusetzen, wurde die Anzahl der Finger dementsprechend beschränkt. Die Steuerung über das Multitouch-Display wurde mit der Steuerung über das Maus-Interface in zwei unterschiedlichen Aufgaben verglichen (Posenerstellung und Pfadverfolgung). Zur Gewöhnung an das neuartige Interface und die Bedienung des Multitouch-Display, erfolgte die Evaluation über mehrere Sitzungen. Zusätzlich wurde als dritte Aufgabe die Echtzeit-Animation des Arms mit dem Multitouch-Display zur Untermalung von Audiomaterial durchgeführt. Ein Vergleich mit dem Maus-Interface war aufgrund der eingeschränkten Zahl an Freiheitsgraden nicht möglich. Anschließend wurden die Versuchspersonen mithilfe eines Fragebogens bezüglich Nützlichkeit, Zufriedenheit, Empfehlung, Bevorzugung und gefühlter Schnelligkeit befragt. Die Ergebnisse zeigten, dass unerfahrene Multitouch-Nutzer generell in der Lage sind, komplexe Aufgaben wie die gleichzeitige Steuerung mehrerer Freiheitsgrade zufriedenstellend, koordiniert und effizient zu lösen. Zudem zeigte sich, dass die Versuchspersonen sich mit dem Multitouch-Interface als kompetenter und effizienter empfanden. Somit erfüllt das vorgestellte Multitouch-Interface wichtige Kriterien einer positiven User Experience. Dies ist eine gute Voraussetzung, dass Multitouch-Interface langfristig als zusätzliches Eingabegerät zu etablieren.

Das folgende Kapitel befasst sich damit, mit der Performanz von Standardinteraktionstechniken für Rotation (*2-Punkt-RT*-Technik) und Translation (Dragging) auf Multitouch.

Vergleich von Translation und Rotation

„Die größten Schwierigkeiten liegen da, wo wir sie nicht suchen.“

Johann Wolfgang von Goethe, 1749–1832, deutscher Dichter

Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung der Frage, ob die Performanz der Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation auf dem Multitouch die gleiche Performanz haben. Es kann gezeigt werden, dass die Standardinteraktionstechnik für Rotation auf einem Multitouch-Display schwerer ist als die für Translation. Somit können zukünftige Arbeiten nach Alternativen oder Optimierungsmöglichkeiten suchen.

5.1. Einleitung

Nachdem im vorherigen Kapitel anhand einer konkreten Aufgabe ein Benutzerinterface auf Basis bestehender Interaktionstechniken entwickelt und evaluiert wurde, geht es in diesem Kapitel darum, die eingesetzten Interaktionstechniken näher zu beleuchten. Dabei wird folgende Forschungsfrage beantwortet: Haben auf Multitouch die Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation die gleiche Performanz? (F6).

Dieses Kapitel beginnt mit der grundlegenden Frage, ob die Standardinteraktionstechniken für Translation (*Dragging*), Rotation (*2-Punkt-RT*) und Skalierung (*Pinch-Geste*) sowie Rotation-Skalierung-Translation (*2-Punkt-RT inklusive Skalierung*) gleich performant sind. Dazu wird eine Studie durchgeführt, die sich an der Arbeit von Stoelen und Akin (2010) orientiert. Stoelen und Akin stellten für ein sensorbasiertes System fest, dass die untersuchten Techniken für Translation und Rotation die gleiche Schwierigkeit aufweisen. Aufbauend auf dieser Annahme konnten sie zeigen, dass sich die Ausführungszeit der kombinierten Interaktion aus Rotation und Translation, über die Summe der Einzelzeiten vorhersagen lässt.

Sie stellten fest, dass sich die vorhergesagten Zeiten nur minimal von den real gemessenen Zeiten unterscheiden. Wenn die Ergebnisse von Stoelen und Akin für Multitouch repliziert und bestätigt werden können, kann ihre Anpassung von Fitts' Gesetz auch für Multitouch angewendet werden (siehe Absatz 3.1.2, Seite 46). Sollten die Ergebnisse von Stoelen und Akin nicht auf Multitouch übertragbar sein, müssten Fitts' Studien und die daraus resultierenden Modelle für jedes Eingabegerät neu überprüft werden. Dieses Ergebnis könnte zukünftige Arbeiten motivieren, weniger performante Interaktionstechniken zu ersetzen bzw. zu optimieren. Zudem könnte es als Entscheidungshilfe dienen, bei neuen Interfaces die richtigen Interaktionstechniken auszuwählen.

5.2. Studie

Die hier vorgestellte Studie soll folgende Hypothesen überprüfen:

Hypothese H1: Die Translation per Dragging ist auf dem Multitouch performanter als die Rotation mit der *2-Punkt-RT*-Technik. Lozano et al. (2011) konnten höhere Muskelaktivitäten und Anstrengungen bei Interaktionen messen, die zwei Finger involvierten. Es wird vermutet, dass sich dies auch negativ auf die Performanz von Rotation auswirkt.

Hypothese H2: Die Skalierung über die *Pinch*-Geste ist aufgrund der kurzen Bewegung und des Einsatzes von nur einem Finger performanter als Rotation und Translation. Balakrishnan und MacKenzie (1997) konnten feststellen, dass Daumen und Zeigefinger bei isolierten Vertikalbewegungen performanter sind als Bewegungen aus dem Arm heraus.

Hypothese H3: Das von Stoelen und Akin (2010) vorgeschlagene Modell für die Vorhersage einer kombinierten Interaktion aus Translation und Rotation ist nicht auf das Multitouch übertragbar (folgt aus H1 und H2).

5.2.1. Aufgabe

In der Studie führte jede Versuchsperson in seiner Sitzung vier verschiedene Aufgaben aus: Translation (T), Rotation (R), Skalierung (S) und eine Kombination der drei Aufgaben zu einer Interaktion, der Rotation-Skalierung-Translation (RST). Diese vier Aufgaben leiten sich aus den gängigsten Interaktionstechniken auf Multitouch-Displays ab, bei denen ein Objekt gleichzeitig bewegt (Translation), skaliert (Skalierung) und rotiert (Rotation) wird.

Ziel jeder Aufgabe war es, ein Objekt von der Startposition in einen Zielbereich zu bewegen. Der Zielbereich wurde durch zwei gestrichelte Linien begrenzt und war grün markiert. Zwischen den beiden gestrichelten Linien deutete eine durchgezogene Linie das eigentliche Ziel (Linie) an. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, nach Möglichkeit dieses Ziel genau zu *treffen*. Ein Trial wurde jedoch bereits als erfolgreich gewertet, wenn das Objekt innerhalb der grünen Fläche abgelegt wurde. Der Abstand zwischen Start- und

Zielobjekt, sowie die Breite der grünen Fläche (Toleranzbereich) variierten für jeden Trial. Die Reihenfolge der Konfigurationen wurde zufällig festgelegt.

Translation (T)

Bei Translation sollte ein Fadenkreuz (rotes Kreuz) in den Zielbereich bewegt werden (siehe Abbildung 5.1). Das Fadenkreuz befand sich im Zentrum einer Kreisfläche mit einem Durchmesser von 70 Pixel. Die Versuchspersonen sollten bei ihren Trials das Ziel treffen, indem sie das rote Kreuz auf die durchgezogene Mittellinie setzten. Die Bewegung verlief immer von links nach rechts.

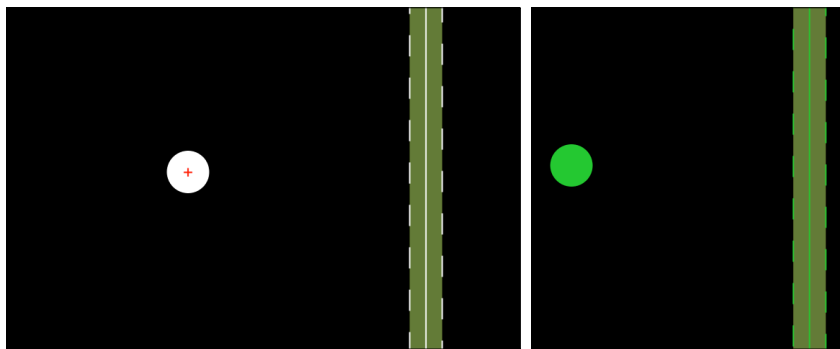


Abbildung 5.1.: Screenshot der Translationsaufgabe (*Dragging*-Aufgabe). In der Startkonfiguration sind die Elemente weiß. Wird der Zeigefinger auf das zu verschiebende Objekt gesetzt, werden alle Elemente grün. Erst dann konnte der Trial gestartet werden.

Rotation (R)

Die Rotationsaufgabe bestand darin, eine Linie durch Rotation um einen *Drehpunkt* (*Pivotpunkt*) zu bewegen (siehe Abbildung 5.2). Dabei bekam die Versuchsperson zwei Kreisflächen zu sehen. Die mittlere Kreisfläche war der Pivotpunkt, um den rotiert wurde. Er wurde als eine nicht bewegbare Kreisfläche dargestellt. Eine Verbindungslinie zwischen dem Pivotpunkt und der äußeren Kreisfläche war die zu rotierende Linie. Die Rotationsbewegung entstand durch eine Bewegung des Daumens auf einer Kreisbahn mit dem Pivotpunkts als Zentrum.

Die Rotationsbewegung verlief gegen den Uhrzeigersinn, d.h. der Daumen wurde von links nach rechts bewegt. Dazu musste zuerst der Zeigefinger auf den Pivotpunkt gesetzt werden. Anschließend musste die zweite Kreisfläche mit dem Daumen *berührt* werden. Erst mit Aufsetzen des zweiten Fingers begann die Messung. Verließ der Zeigefinger bei der Rotationsbewegung die Kreisfläche des Pivotpunkts, so wurde der Trial abgebrochen und musste wiederholt werden. Dieser Abbruch wurde jedoch nicht als Fehlversuch gewertet.

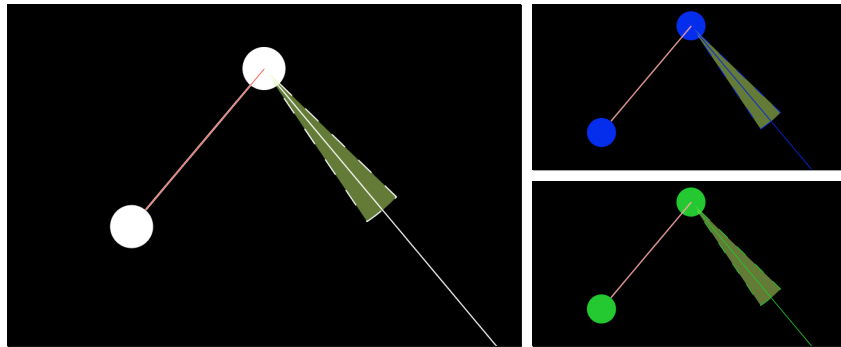


Abbildung 5.2.: Screenshot der Rotationsaufgabe. In der Startkonfiguration sind alle Elemente weiß. Wird der Zeigefinger auf den Pivotpunkt (obere Kreisfläche) gesetzt, werden sie blau. Berührt der Daumen noch die zweite Kreisfläche für die Skalierung und Rotation, so werden alle Elemente grün. Erst wenn alle Elemente grün waren, konnte der Trial gestartet werden.

Skalierung (S)

Als Geste für die die Skalierung wurde die bekannte *Pinch*-Geste implementiert (Avery et al., 2014; Hoggan et al., 2013a; Ni et al., 2011; Spindler et al., 2014). Ähnlich wie bei der Rotation wurden zwei Kreisflächen für die Interaktion vorgegeben. Die obere Kreisfläche sollte vom Zeigefinger berührt werden. Die untere Kreisfläche konnte bewegt werden und wurde über den Daumen gesteuert. Im Gegensatz zur *Pinch*-Geste war die obere Kreisfläche und somit auch der Zeigefinger fixiert. Die Bewegung des Daumens verlief in allen Trials von unten nach oben (siehe Abbildung 5.3).

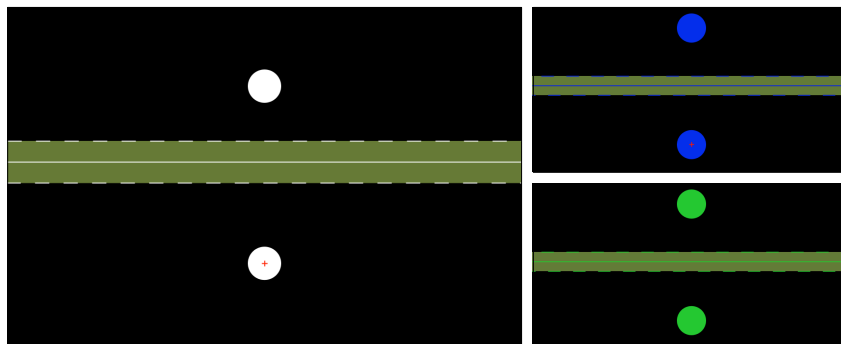


Abbildung 5.3.: Screenshot der Skalierungsaufgabe. In der Startkonfiguration sind alle Elemente weiß. Wird der Zeigefinger auf den Pivotpunkt (obere Kreisfläche) gesetzt, werden sie blau. Berührt der Daumen noch die zweite Kreisfläche für die Skalierung und Rotation, so werden alle Elemente grün. Erst wenn alle Elemente grün waren, konnte der Trial gestartet werden.

Rotation-Skalierung-Translation (RST)

Ziel dieser Aufgabe war es durch Kombination der Aufgaben R, S und T drei verschiedene Objekte in die entsprechenden Zielzonen zu bewegen. Abbildung 5.4 illustriert die visuelle Darstellung der Aufgabe.

Die Teilaufgaben entsprechen genau den Vorgaben wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben. Die Farbe der Objekte änderte sich von weiß in blau, sobald der erste Finger das erste Objekt berührte. Grün wurden die Objekte sobald auch der zweite Finger auf das zweite Objekt gesetzt wurde. Die Zeitmessung startete jedoch erst, wenn die beweglichen Objekte tatsächlich bewegt wurden.

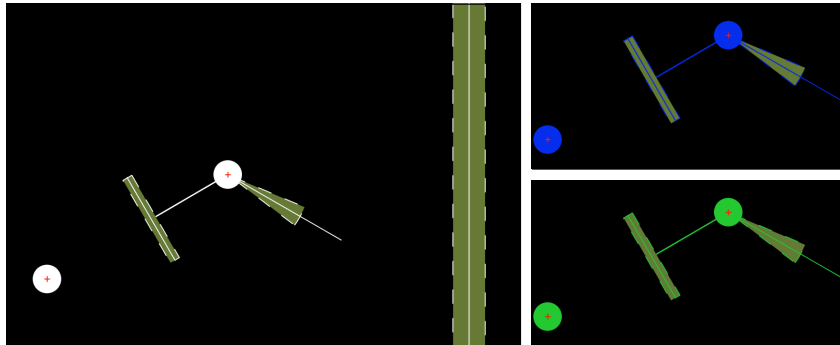


Abbildung 5.4.: Screenshot der kombinierten Aufgabe: Rotation-Skalierung-Translation (RST). In der Startkonfiguration sind alle Elemente weiß. Wird der Zeigefinger auf den Pivotpunkt (obere Kreisfläche) gesetzt, wird sie blau. Berührt der Daumen noch die zweite Kreisfläche für die Skalierung und Rotation, so werden alle Elemente grün.

5.2.2. Versuchspersonen

Für die Evaluation wurden 16 Versuchspersonen über E-Mail-Verteiler, Aushängen auf dem Universitätscampus und Aufrufen über Facebook rekrutiert. Das Alter variierte zwischen 22 und 33 Jahren bei einem Durchschnitt von 25.63 Jahren. Bis auf zwei Versuchspersonen waren alle Rechtshänder. Diese verwendeten jedoch trotzdem die Maus rechtshändig. Alle hatten bis auf zwei Versuchspersonen Erfahrung mit Single- oder Multitouch-Geräten. Acht Versuchspersonen gaben an, Touch-Geräte häufig oder sehr häufig zu verwenden. Acht gaben an, solche Geräte nur selten oder überhaupt nicht zu verwenden. Jede Versuchsperson erhielt eine Aufwandsentschädigung von 8 €.

5.2.3. Ausrüstung und Material

Ausrüstung

Die Studie fand in einer kontrollierten Umgebung statt. Zur Eingabe diente ein 22 Zoll Multitouch-Display der Marke 3M mit einer Auflösung von 1680×1050 Pixel und einer Reaktionsgeschwindigkeit für Berührungspunkte von < 6 ms. Das Display wurde in einem Winkel von 50° vor den Versuchspersonen auf einem Tisch platziert (siehe Abbildung 5.5). Diese Neigung wurde in Vorstudien von den Testpersonen als am angenehmsten empfunden. Die Testumgebung wurde in Java implementiert und lief zusammen mit den Gerätetreibern des Multitouch-Display auf einem iMac.



Abbildung 5.5.: Versuchsaufbau mit dem Multitouch-Display in der verwendeten Neigung.

Material

Bei den verschiedenen Aufgaben wurden insgesamt 16 Konfigurationen eingesetzt. Diese ergaben sich aus vier verschiedenen Distanz- und vier verschiedenen Toleranzwerten. Für jede Konfiguration wurde die entsprechende *ID* mithilfe der Shannon-Formel (siehe Formel 2.3 in Abschnitt 2.2.1) berechnet. Die *ID* beschreibt den Schwierigkeitsgrad einer Konfiguration. Je größer die Index of Difficulty (ID), desto schwieriger ist die Konfiguration bzw. die Aufgabe. Tabelle 5.1 zeigt die Konfigurationenwerte für die Aufgaben R, S und T.

Kombination	Translation			Rotation			Skalierung		
	A	W	ID _t	δ	θ	ID _r	A	W	ID _s
1	4,8	0,6	3,1	40	3	3,8	4,0	0,6	0,0
2	4,8	1,3	2,2	40	6	2,9	4,0	1,3	0,0
3	4,8	1,9	1,8	40	9	2,4	4,0	1,9	0,0
4	4,8	2,5	1,5	40	12	2,1	4,0	2,5	0,0
5	9,5	0,6	4,0	80	3	4,8	6,0	0,6	0,0
6	9,5	1,3	3,1	80	6	3,8	6,0	1,3	0,0
7	9,5	1,9	2,6	80	9	3,3	6,0	1,9	0,0
8	9,5	2,5	2,2	80	12	2,9	6,0	2,5	0,0
9	14,3	0,6	4,6	120	3	5,4	8,0	0,6	0,0
10	14,3	1,3	3,6	120	6	4,4	8,0	1,3	0,0
11	14,3	1,9	3,1	120	9	3,8	8,0	1,9	0,0
12	14,3	2,5	2,7	120	12	3,5	8,0	2,5	0,0
13	19,1	0,6	5,0	160	3	5,8	10,0	0,6	0,0
14	19,1	1,3	4,0	160	6	4,8	10,0	1,3	0,0
15	19,1	1,9	3,5	160	9	4,2	10,0	1,9	0,0
16	19,1	2,5	3,1	160	12	3,8	10,0	2,5	0,0
Minimum	4,8	0,6	1,5	40	3	2,1	4,0	0,6	0,0
Maximum	19,1	2,5	5,0	160	12	5,8	10,0	2,5	0,0

Tabelle 5.1.: Verwendete Kombinationen für Translation, Rotation und Skalierung. Distanzen *A* und Toleranzen *W* für die Aufgaben Translation, Rotation und Skalierung sind in cm bzw. die Winkel δ und θ in Grad angegeben.

RST verwendete insgesamt 64 verschiedene Konfigurationen. Diese Konfigurationen resultierten aus der Kombination der Werte für Distanz und Toleranz der jeweiligen Unteraufgaben (R, S und T). Die einzelnen verwendeten Werte sind in Tabelle 5.2 zu finden. Um bei den Konfigurationen einen Reihenfolgen- bzw. Lerneffekt zu vermeiden, wurden

Wertpaar	Translation		Rotation		Skalierung	
	A	W	δ	θ	A	W
1	4,8	0,6	40	4	3,8	0,6
2	14,3	1,9	120	12	6,8	1,9

Tabelle 5.2.: Verwendete Werte für die Konfigurationen für RST. Distanzen A und Toleranzen W sind in cm angegeben. Angaben des auszuführenden Winkel δ und der Winkeltoleranz θ sind in Grad.

die Konfigurationen permutiert. Zuerst wurden die einzelnen Konfigurationen in zufälliger Reihenfolge in einer Liste abgespeichert. Diese Liste wurde dann erneut in zwei Hälften unterteilt und in zwei separaten Listen gespeichert (A und B). Die Elemente der Listen A und B wurden anschließend in umgedrehter Reihenfolge in zwei weitere Listen A' und B' kopiert. Für die endgültigen Konfigurationslisten wurden diese vier Listen erneut zusammengefügt, sodass immer A oder A' mit B bzw. B' zusammengefasst wurden. Tabelle 5.3 zeigt die acht eingesetzten Konfigurationssets. Versuchsperson 1 begann mit Konfiguration 1, Versuchsperson 2 mit Konfiguration 2 usw. Die Liste wiederholte sich wieder ab Versuchsperson 9.

Konfiguration	Teil 1	Teil 2
1	A	B
2	A	B'
3	A'	B
4	A'	B'
5	B	A
6	B	A'
7	B'	A
8	B'	A'

Tabelle 5.3.: Permutierte Zusammenstellung der Konfigurationsdateien.

5.2.4. Versuchsplan

Die 16 Einzelkonfigurationen wurden für R, S und T jeweils neun Mal wiederholt. Damit bekam jede Versuchsperson 144 Trials für diese Aufgaben. Bei RST waren es drei Wiederholungen pro Konfiguration und somit 192 Trials. Demnach musste jede Versuchsperson insgesamt 624 Trials absolvieren. Bei 16 Versuchspersonen wurden demnach insgesamt 9984 Datensätze analysiert:

T, R, S		RST	
	3 Aufgaben		
×	16 Versuchspersonen		16 Versuchspersonen
×	3 Blöcke	×	4 Blöcke
×	48 Trials pro Block	×	48 Trials pro Block
=	6912 Datensätze	=	3072 Datensätze

Um einen Reihenfolgen- bzw. Lerneffekt bei den Aufgaben zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Anfangsaufgabe im *Latin-Square*-Verfahren permutiert. Die erste Versuchsperson startete mit folgender Reihenfolge: Translation, Rotation, Skalierung und RST. Für die nachfolgende Versuchsperson verschoben sich die Aufgaben jeweils um eine Position nach links, sodass die zweite Versuchsperson folgende Reihenfolge erhielt: R, S, RST und als letztes T.

Als Design wurde ein *Within-Subject-Design* mit einer unabhängigen Variablen gewählt. Die unabhängige Variable bestand aus den verschiedenen Konfigurationen für die einzelnen Aufgaben.

Als abhängige Variable wurden folgende Werte gemessen:

1. *DT*: Zeitspanne zwischen Selektion des Objektes bis zum Eindringen des Kreuzes in den Toleranzbereich der Zielfläche
2. *CT*: Zeitspanne zwischen Eindringen des Kreuzes in den Toleranzbereich und Abheben des Fingers
3. Fehlerrate

5.2.5. Durchführung

Vor der eigentlichen Messung absolvierten die Versuchspersonen eine Übungsphase mit jeweils 48 Trials. Dabei wurden die 16 Grundkonfigurationen der jeweiligen Aufgabe dreimal in zufälliger Reihenfolge ausgeführt. Im Anschluss erhielten die Versuchspersonen bei den Aufgaben T, R und S jeweils 144 Trials. Sie wurden in drei Blöcken zu je 48 Trials untergliedert. Zwischen den Blöcken wurde immer eine Pause von mindestens 15 Sekunden eingeschoben. Den Versuchspersonen war es aber freigestellt auch zwischen den einzelnen Trials bei Bedarf Pausen einzulegen. Bei der RST-Aufgabe erhielten die Versuchspersonen 192 Trials, die in vier Blöcke zu je 48 Trials aufgeteilt wurden.

Die Versuchspersonen wurden instruiert die Aufgabe so schnell wie möglich durchzuführen. Gleichzeitig jedoch so wenig Fehler wie möglich machen. Während der Übungsphase wurde die Fehlerquote eingeblendet, sodass die Versuchspersonen ein Gefühl dafür bekamen und die Möglichkeit hatten ihre Performance zu verbessern ohne die Fehlerquote zu verschlechtern. Während dem Hauptdurchgang wurde die Fehlerquote nicht mehr angezeigt.

Ein Trial wurde gestartet, sobald der Finger das erste Objekt berührte (siehe auch Abschnitt 5.2.1, Seite 118). Dies wurde angezeigt, indem sich die Farbe der Objekte auf dem Bildschirm veränderte: Bei Interaktionen mit einem Finger änderte sich die Farbe von blau in grün, sobald der Finger das Objekt berührte. Bei Interaktionen mit zwei Fingern (S, R, RST) änderte sich die Farbe von weiß in blau, sobald der erste Finger das erste Objekt berührte. Grün wurden die Objekte sobald auch der zweite Finger auf das zweite Objekt gesetzt wurde. Die Zeitmessung startete jedoch erst, wenn die beweglichen Objekte mindestens um 5 mm bewegt wurden. Dieser Wert stammt aus Voruntersuchungen und bildet den Zeitpunkt ab, ab dem die Nutzer das Gefühl haben, das Objekt verschoben zu haben.

Es gab drei Möglichkeiten der Versuchsauswertung.

1. **Erfolg:** Ein Trial wurde als erfolgreich gewertet, wenn der Finger abgehoben wurde und das entsprechende Objekt sich innerhalb des Zielbereiches befand. In diesem Fall leuchtete ein grünes Häkchen auf und ein hochfrequenter Sound ertönte (siehe Abbildung 5.6a). Erst nachdem eine Konfiguration erfolgreich durchgeführt wurde, bekam die Versuchsperson eine neue Konfiguration.
2. **Fehler:** Als Fehlversuch galt, wenn sich das Objekt außerhalb des Zielbereiches befand, als der Trial von der Versuchsperson beendet wurde. Dies wurde mit einem roten Kreuz und mit einem mittelhohen Ton rückgemeldet (siehe Abbildung 5.6b). Die Konfiguration wurde solange wiederholt, bis sie erfolgreich durchgeführt wurde.
3. **Abbruch:** Abbrüche wurden registriert, wenn ein Finger abgehoben wurde, ohne dass die Objekte vorher bewegt wurden. Dies geschah beispielsweise oft, wenn die Versuchspersonen den ersten Finger aufsetzten und unmittelbar wieder abhoben, um den Finger zu trocknen. Abbrüche wurden den Versuchspersonen mit einem gelben Ausrufezeichen und einem dumpfen Ton mitgeteilt (siehe Abbildung 5.6c). Auch bei einem Abbruch wurde die Konfiguration wiederholt.

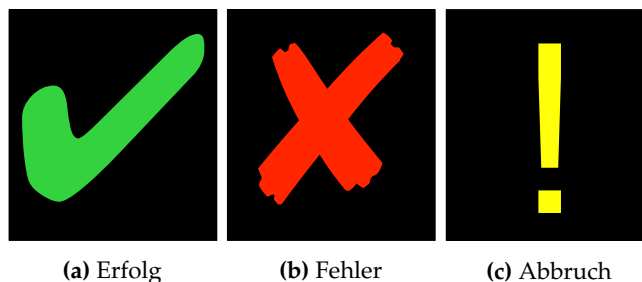


Abbildung 5.6.: Versuchsauswertung. Feedback an die Versuchspersonen bei Erfolg (a), Fehler (b) und Abbruch (c).

Nachdem die Versuchspersonen alle Aufgaben absolviert hatten, füllten sie einen Fragebogen aus. Darin sollten sie angeben, ob es bei dem Lösen der Aufgaben Probleme gab, ob eine Aufgabe besonders schwer war, ob ihnen sonst etwas aufgefallen ist und ob sie Verbesserungsvorschläge für das Design dieser Studie hätten. Auch sollten sie angeben, welche Aufgabe sie am schwersten fanden und welche für sie am ermüdendsten war. Die Durchführung dauerte pro Versuchspersonen zwischen 45 und 60 Minuten.

5.3. Ergebnisse

5.3.1. Bereinigung der Durchführungszeiten

Wie in Soukoreff und MacKenzie (2004) vorgeschlagen, wurden zur Analyse und Berechnung der Regressionsgeraden die Durchführungszeiten um die Reaktionszeit (*RT*) *bereinigt* und nur die reine Ausführungszeit (*MT*) berücksichtigt. *MT* ist die Dauer vom Beginn der Interaktion durch Auflegen des Fingers auf das Multitouch bis zum erfolgreichen Einloggen des Versuchs. Durch die Bereinigung der Zeiten, konnte der multiple Korrelationskoeffizient R^2 bei Aufgaben, die Rotationen enthielten, um ca. 15 % verbessert werden (siehe Tabelle 5.4).

Aufgabe	Ausführungszeit			Bewegungszeit		
	Schnittpunkt	Steigung	R^2	Schnittpunkt	Steigung	R^2
Translation	0,2523	0,2022	0,982	0,1333	0,2028	0,985
Rotation	0,1924	0,3466	0,809	0,1199	0,3378	0,948
Skalierung	0,4097	0,1828	0,935	0,296	0,1851	0,943
RST	1,268	0,3162	0,817	1,1648	0,3191	0,954

Tabelle 5.4.: Ergebnisse nach Bereinigung der Durchführungszeiten. Durch Ausschluss der Reaktionszeit konnte der multiple Korrelationskoeffizient um ca. 15 % bei den Aufgaben mit Rotationen verbessert werden (rot markierte Werte).

5.3.2. Regressionsanalyse

Effizienz

Zum Vergleich der Schwierigkeiten der einzelnen Aufgaben werden die durchschnittlichen Ausführungszeiten unter den entsprechenden *ID* zusammengefasst und eine Regressionsgerade anhand dieser Werte berechnet. Abbildung 5.7 zeigt die Regressionsgerade der einzelnen Aufgaben. Mit Hilfe dieser Regressionsgeraden kann die Schwierigkeit einer Aufgabe nach Fitts' Modell abgeleitet werden. Dabei zeigt die Steigung der jeweiligen Geraden die Schwierigkeit einer Aufgabe, während der Schnittpunkt die aufgaben- oder gerätespezifische Verzögerung darstellt (Zhai, 2004).

Die geringste Abweichung in der Steigung haben Translation und Skalierung mit einer Abweichung von ca. 10 %. Die Regressionsgerade der Rotationsaufgabe zeigt hingegen eine um ca. 70 % höhere Steigung als die der Translation. Die Steigung von RST und Rotation zeigen ähnliche Werte. Sie unterscheiden sich nur um ca. 6 %. Dies gilt auch für den Vergleich der Schnittpunkte. Die Schnittpunkte von Rotation und RST weichen stark von den Schnittpunkten von Translation und Skalierung ab. Die genauen prozentualen Abweichungen können aus Tabelle 5.5 entnommen werden. Als Referenzwerte wurden die Werte der Geraden von Translation verwendet.

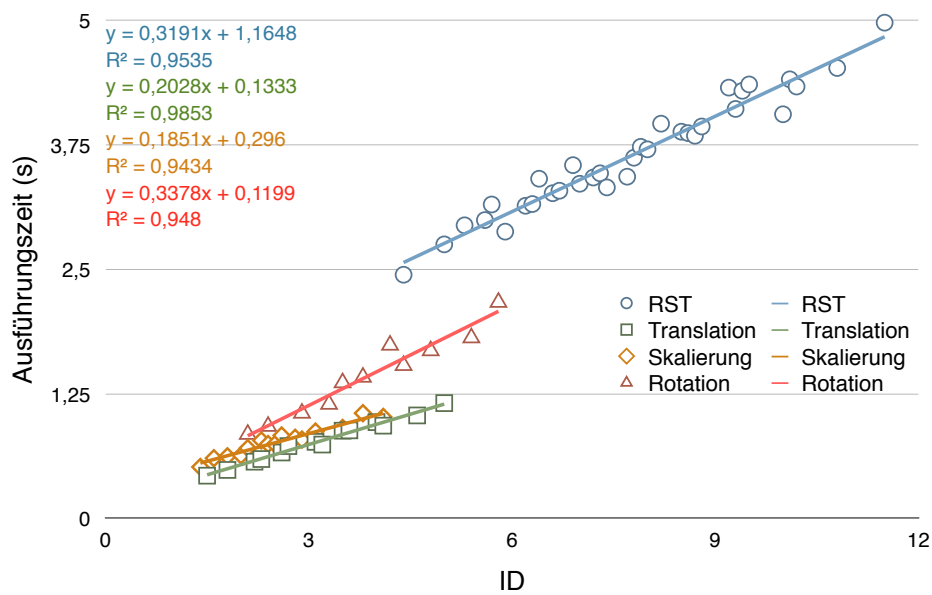


Abbildung 5.7.: Regressionsgeraden von Translation, Skalierung, Rotation und RST. Die x-Achse zeichnet die *ID* und die y-Achse die durchschnittliche Ausführungszeit in Sekunden an. Interaktionen, die Rotation beinhalten haben einen steileren Anstieg als Interaktionen ohne Rotation (Translation und Skalierung).

	Schnittpunkt		Steigung	
Translation	0.13	100 %	0.20	100 %
Rotation	0.20	89.9 %	0.34	166.6 %
Skalierung	0.30	222.1 %	0.19	91.3 %
RST	1.16	873.8 %	0.32	157.3 %

Tabelle 5.5.: Prozentuale Abweichungen der Effizienz. Als Referenzwert für die Abweichungen gelten Schnittpunkt und Steigung der Regressionsgerade für Translation.

Performanz

Die Analysen der Performanz wurden nach Zhai (2004) durchgeführt. Dazu wurde die *IP* über den Kehrwert der Steigung $1/b$ berechnet. Die Analyse zeigt die höchste Performanz für Skalierung mit 5.4 *bits/s* und anschließend Translation mit 4.9 *bits/s*. Interaktionen die Rotationen enthalten weisen einen um bis zu 40 % niedrigeren *IP* auf (siehe Tabelle 5.6)

	1/b (bits/s)	
Translation	4.93	100 %
Rotation	2.96	60 %
Skalierung	5.40	110 %
RST	3.11	63 %

Tabelle 5.6.: Prozentuale Abweichungen der Performanz. Als Referenzwert für die Abweichungen gelten Schnittpunkt und Steigung der Regressionsgerade für Translation.

5.3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend konnten für den Vergleich von Rotation mit Translation folgende Ergebnisse aus dieser Studie extrahiert werden: Interaktionen, die ausschließlich Translationen – in Form von Skalierung oder reiner Translation – beinhalten, weisen eine vergleichbare Steigung und Performanz auf. Ebenso haben Interaktionen, die Rotationen beinhalten, eine vergleichbare Steigung und Performanz. Hinsichtlich der Steigung weichen die von reinen Translations-Interaktionen stark von den Steigungen von reinen Rotations-Interaktionen ab: Die Steigungshöhe für Letzteres ist höher als für reine Translations-Interaktionen. Die Schnittpunkte von Interaktionen mit Rotation sind deutlich höher als die Schnittpunkte von Translation und Skalierung.

5.4. Diskussion

Hypothese H1 nahm eine höhere Performanz bei Translation per Dragging auf dem Multitouch als bei Rotation mit der *2-Punkt-RT*-Technik an. Hypothese H2 ging von einer höheren Performanz bei Skalierung per *Pinch-Geste* gegenüber Rotation und Translation aus. Beides konnte in dieser Studie bestätigt werden. Diese Ergebnisse widersprechen allerdings Stoelen und Akin (2010), die für Translation und Rotation die gleichen Performanzen ermittelten. Das hier verwendete Untersuchungsdesign ähnelt ihrem und es werden dieselben Werte für Translation und Rotation benutzt. Nur Eingabegerät und dementsprechend die Interaktionstechnik unterscheiden sich in den beiden Studien – hier wird ein Multitouch-Display, kein sensorbasiertes System eingesetzt. Eine Übertragung von Letzterem auf Multitouch ist also nicht ohne Weiteres möglich. Dies bestätigt Hypothese H3, die davon ausging, dass das vorgeschlagene Modell für die Vorhersage einer kombinierten Interaktion aus Translation und Rotation nach Stoelen und Akin nicht auf das Multitouch übertragbar ist. Dies wird auch gestützt durch die Ergebnisse von Zhao et al. (2015), die ein eigenes Vorhersagemodell für eine RST-Aufgabe auf Multitouch entwickelten. Im Vergleich zu dem von Stoelen und Akin, für das lediglich geringe Korrelationen ($R^2=0.79$; $R^2=0.77$) gefunden werden konnten, erreicht dieses Maß eine sehr viel höhere Korrelationen ($R^2=0.90$; $R^2=0.91$). Die hier vorliegende Studie kann erstmals eine Erklärung für die Ergebnisse von Zhao et al. liefern, die selbst keine Vermutungen zu den Ursachen für diesen Unterschied äußerten. Demnach gilt: Eine Übertragung der Formel von Stoelen und Akin auf ein neues Eingabegerät muss immer überprüft werden, insbesondere da für die Anwendbarkeit des Modells Interaktionstechniken mit gleicher Performanz (d.h. Regressionsgeraden mit gleicher Steigung) vorausgesetzt werden.

Die Performanzunterschiede könnten auf verschiedenen Faktoren beruhen: Die hier beobachtete geringere Performanz von Rotation könnte auf die Eigenschaften der Interaktionstechnik zurückzuführen sein. Diese sind abhängig von den Ein- und Ausgabegeräten. Bei Multitouch-Interaktionstechniken lassen sich aufgrund der direkten Eingabe über das Multitouch-Display Verdeckungen nicht vermeiden – hier z. B. verdeckt die rechte Hand bei Rechtsbewegungen Teile der angezeigten Elemente. Diese Verdeckung tritt bei Rotationsbewegungen stärker auf als bei Translationsbewegungen. Der Benutzer muss sich bei

der Rotation also *blind* bewegen. Dies wird dadurch gestützt, dass bei der Translation ein flüssigeres Arbeiten beobachtet werden konnte.

Des Weiteren könnte die geringere Performanz von Rotation auf deren unterschiedliche Ausführung auf den beiden Eingabegeräten zurückzuführen sein. Ein sensorbasiertes System erfordert lediglich eine Drehung des Handgelenks, während bei der *2-Punkt-RT*-Technik bei Multitouch eine komplexere Bewegung ausgeführt werden muss: Hierbei muss insbesondere bei großen Winkeln der Oberarm mitbewegt werden. Diese Bewegung weist eine höhere Muskelaktivität auf (Lozano et al., 2011). Inwiefern sich die Muskelaktivität zwischen den beiden Eingabegeräten und den daraus resultierenden Interaktionstechniken unterscheiden, könnte in einer weiterführenden Studie untersucht werden.

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass uni- und bimanuale Interaktionstechniken unterschiedliche Effizienz bzw. Performanz haben können (Guiard, 1987; Kabbash et al., 1994; Kin et al., 2009; Latulipe, 2006). Betrachtet man die Interaktionstechnik von Stoelen und Akin, so lässt sich diese nach Guiard (1987) als bimanuale Interaktion einordnen, da die dominante Hand die feinmotorische Arbeit und die nicht-dominante Hand die grobmotorische Arbeit verrichtet (Knopfdrücken). Dies ermöglicht eine höhere Präzision. Eine unimanuale Interaktion, wie sie in der hier vorliegenden Arbeit eingesetzt wurde, erzwingt hingegen ein sorgsameres und genaueres Arbeiten. Denn ruckartige Bewegungen könnten die erreichte Konfiguration ungewollt verändern. Somit könnte die Konzeption als uni- bzw. bimanuale Interaktion in den beiden Studien ein weiterer Grund für die Unterschiede in der Performanz sein.

Nach Guiard (1987), Kabbash et al. (1994) und Latulipe (2006) ist die Aufgabenklassifizierung (symmetrisch vs. asymmetrisch, unimanual vs. bimanual) für das optimale Design der Interaktionstechnik entscheidend. Daher bleibt zu prüfen, ob die von Stoelen und Akin untersuchte und hier replizierte Aufgabe als asymmetrisch bimanuale Aufgabe zu sehen ist und daher idealerweise auch mit einer solchen Interaktionstechnik gelöst werden sollte.

Die höchste Performanz wurde hier bei der Skalierung durch den Daumen gemessen. Die Translation wurde über Bewegungen des Arms durchgeführt und hatte eine niedrigere Performanz. Dies deckt sich mit früheren Arbeiten, die ebenfalls höhere Performanz von Fingern im Vergleich zum Oberarm feststellten (Balakrishnan und MacKenzie, 1997; Lozano et al., 2011; Rosenbaum et al., 1991; Zhai et al., 1996). Somit könnte die *Pinch-Geste* nicht nur für die Skalierung eingesetzt werden, sondern auch für die Rotation. Dies könnte anhand von vertikal angeordneten Schieberegler realisiert werden. Abbildung 5.8 demonstriert eine Möglichkeit für solch ein Interface mit Schieberegler für die Rotation. Ein Schieberegler würde die Rotation aus dem Handgelenke umgehen und die hohe Performanz des Daumens ausnutzen. Die Wiederverwendung der *Pinch-Geste* für zwei Aufgaben würde zudem die Erlernbarkeit des Interface erhöhen (Wu et al., 2006).

Kritisch anzumerken ist, dass in dieser Studie nur Rechtsbewegungen für Translation und Rotation untersucht wurden. Daher sollten zukünftige Arbeiten die Untersuchungen auf Linksrotationen erweitern und den Pivotpunkt auch über das Multitouch-Display verteilen. Eine Untersuchung für die Translation über das gesamte Multitouch-Display findet sich in Kapitel 7.

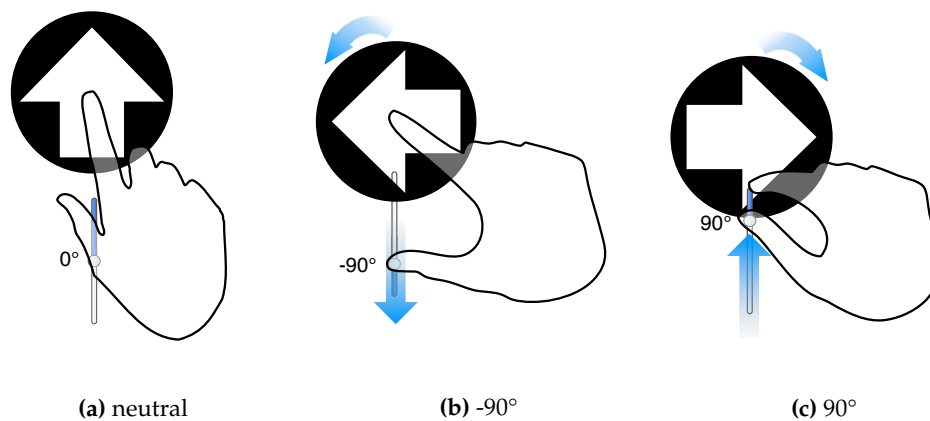


Abbildung 5.8.: Rotation über Schieberegler. In der neutralen Stellung kann das Objekt unabhängig bewegt werden (a). Mithilfe der Schieberegler kann das Objekt beliebig rotiert werden (b)-(c).

Für die eingangs formulierte Forschungsfrage kann aus den Ergebnissen folgender Schluss gezogen werden:

F6: Haben auf Multitouch die Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation die gleiche Performanz?

Der Vergleich des Index of Performance (*IP*) belegt, dass die Standardinteraktionstechnik für Translation auf Multitouch performanter ist als die Standardinteraktionstechnik für Rotation. Für Multitouch-Interaktionen sollte nach alternativen Rotationstechniken gesucht werden, um für Rotationen eine vergleichbare Performanz wie für Translationen zu erreichen sowie eine höhere Effizienz und Intuitivität bei Rotationen zu erreichen. Es ist anzumerken, dass frühere Arbeiten für mehrere andere Eingabegeräte keine Performanzunterschiede zwischen Translation und Rotation feststellen konnten (u. a. Crossman und Goodeve, 1983; Stoelen und Akin, 2010). Dies zeigt, dass sich die Ergebnisse von Untersuchungen zu Interaktionstechniken in der Regel nicht einfach auf andere Eingabegeräte übertragen lassen. Sie müssen für jedes Eingabegerät neu validiert werden.

5.5. Zusammenfassung

Innerhalb dieser Studie wurden die Standardinteraktionstechniken für Rotation und Translation miteinander verglichen. Untersucht wurden die *2-Punkt-RT-Technik* (Rotation), das *Dragging* (Translation), die *Pinch-Geste* (Skalierung) und die *2-Punkt-RT-Technik mit Skalierung* (Rotation-Skalierung-Translation). Innerhalb einer Studie nach Fitts wurden diese Interaktionstechniken eingesetzt, um Objekte von einem Startpunkt in eine Zielfläche zu verschieben. Die Translation weist sowohl für einfache Interaktionen als auch für kombinierte Bewegungen, die eine parallele Ausführung verschiedener Interaktionen erfordern, eine höhere Performanz auf als die Rotation. Die Skalierungstechnik ist als eine vertikale Translationsbewegung des Daumens zu verstehen. Sie zeigt eine höhere Performanz als

eine horizontale Translation mit dem Zeigefinger. Dies lässt vermuten, dass die Rotation aus dem Handgelenk der entscheidende Faktor für die geringere Performanz der Rotationstechnik sein könnte. Stoelen und Akin (2010) stellten eine gleiche Performanz von Translations- und Rotationsbewegungen für ein sensorbasiertes System fest. Dieses Ergebnis konnte für Multitouch-Displays nicht bestätigt werden. Die von Stoelen und Akin abgeleitete Erweiterung von Fitts' Gesetz zur Vorhersage von kombinierten Interaktionen setzt eine gleiche Performanz zwischen den Interaktionstechniken voraus, was es unbrauchbar für die Multitouch-Anwendung macht.

Das nachfolgende Kapitel fokussiert die Schwierigkeit und Effizienz der *2-Punkt-RT*-Technik. Als Standardinteraktionstechnik für kombinierte Rotations- und Translationsbewegungen dient sie dazu, Aspekte gleich- und entgegengesetzt gerichteter Fingerbewegungen zu untersuchen.

Schwierigkeit und Effizienz von Rotation und Translation

„*Bewegung ist alles, die Richtung entscheidet.*“

Manfred Hinrich, 1926–2015, deutscher Philosoph

Nachdem im vorherigen Kapitel die Performanz der Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation auf einem Multitouch-Display getrennt voneinander untersucht wurde, befasst sich dieses Kapitel mit der Schwierigkeit und Effizienz bei einer Kombination aus beiden Interaktionstechniken. Anhand der *2-Punkt-RT*-Technik kann gezeigt werden, dass unterschiedliche Bewegungsrichtungen der Finger die Schwierigkeit einer Bewegung erhöhen. Zudem wirkt sich insbesondere die Translationsrichtung einer Bewegung auf die Effizienz bei der *2-Punkt-RT*-Technik aus. Teile dieses Kapitels wurden auf der *ACM Konferenz Conference on Human Factors in Computing Systems 2014* publiziert (Nguyen und Kipp, 2014).

6.1. Einleitung

Dieses Kapitel untersucht die Bedingungen, die eine kombinierte Rotations-Translations-Bewegung (RT) beeinflussen. Hierbei werden folgende Forschungsfragen beleuchtet: Spielt die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation bei Multitouch eine Rolle für die Effizienz? (F5). Wirkt sich die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation auch auf die Schwierigkeit der Interaktionstechnik aus? (F8).

Erkenntnisse zu diesen Fragen können dabei helfen, Interaktionstechniken zu optimieren (Hoggan et al., 2013b), damit eine höhere Zufriedenheit der Nutzer während der Interaktion erreicht werden kann (Olafsdottir et al., 2014). Untersuchungsgegenstand ist die *2-Punkt-RT*-

Technik, die als Standardinteraktionstechnik für die gleichzeitige Rotation und Translation auf einem Multitouch-Gerät gilt (Hancock et al., 2006; Hoggan et al., 2013b). Der Fokus dieser Studie liegt auf den Bewegungsrichtungen der involvierten Finger, die bei dieser Interaktion unterschiedlich kombiniert werden können. Bei den Interaktionen können der eingesetzte Daumen und Zeigefinger entweder in die gleiche Richtung (*unidirektional*) oder in entgegengesetzte Richtungen (*bidirektional*) bewegt werden. Die Ergebnisse dieser Studie sollen Aufschluss darüber geben, ob unidirektionale oder bidirektionale Interaktionen zum einen weniger schwierig und somit intuitiver und benutzerfreundlicher (*Usability*) sowie zum anderen effizienter sind.

Als Indikator für die Schwierigkeit dient die Anzahl der von den Nutzern eingesetzten Strategien sowie die Reaktionszeit der Nutzer. Eine Strategie beschreibt die Vorgehensweise, die dabei angewendet wird. Wang et al. (1998) stellten beispielsweise fest, dass die Versuchspersonen bei der Rotation und Translation eines realen Würfels zuerst die Translation und dann die Rotation durchführen. Je weniger Strategien ein Nutzer zur Lösung einer Aufgabe verwendet, desto eher ist anzunehmen, dass er die Aufgabe verstanden und eine konkrete Vorstellung davon hat, wie sie am besten zu lösen ist. Springt er hingegen zwischen mehreren Strategien, so scheint er sich nicht sicher zu sein, welche Strategie zur effizientesten Lösung führt. Dabei werden zwei Hauptkategorien erwartet: Parallele (siehe Abbildungen 6.1a– 6.1d) und sequentielle Strategien. Diese Strategien können nach Wang et al. (1998) zusätzlich in zwei weitere Unterkategorien aufgeteilt werden: Sequentielle Strategien mit Translation zuerst (siehe Abbildungen 6.1e – 6.1h) oder mit Rotation zuerst (siehe Abbildungen 6.1i – 6.1l).

Ein weiterer Indikator ist die Reaktionszeit. Sie bildet die Zeit ab, die der Nutzer braucht, um die Aufgabe zu erfassen und sich eine mögliche Strategie zu deren Lösung zu überlegen. Olafsdottir et al. (2014) bezeichnen diese als Planungszeit und gehen davon aus, dass schwierigere Aufgaben zu längeren Planungszeiten führen. Auch Wobbrock et al. (2009) konnten eine Korrelation zwischen Planungszeit und der Komplexität einer Aufgabe feststellen. Je komplexer die Aufgabe, desto länger dauert es, bis die Nutzer mit der Aufgabe beginnen.

6.2. Studie

Um uni- und bidirektionale Bewegungen hinsichtlich ihrer Schwierigkeit und Effizienz zu untersuchen, sollen folgende drei Hypothesen überprüft werden:

Hypothese H1: Rechtsgerichtete Translationsbewegungen sind effizienter als linksgerichtete. Zhao et al. (2015) konnten für Interaktionen mit Rotation-Skalierung-Translation schnellere Werte bei Rechtsbewegungen messen. Es wird angenommen, dass dies auch für RT-Bewegungen gilt. Ebenso haben Olafsdottir et al. (2014) für Bewegungen nach links längere Planungszeiten feststellen können.

Hypothese H2: Bidirektionale Bewegungen sind schwieriger als unidirektionale Bewegungen. Dies wäre an häufigen Strategiewechseln während der Lösung der Aufgaben zu erkennen. Hoggan et al. (2013b) stützen dies mit den Ergebnissen ihrer Untersuchung

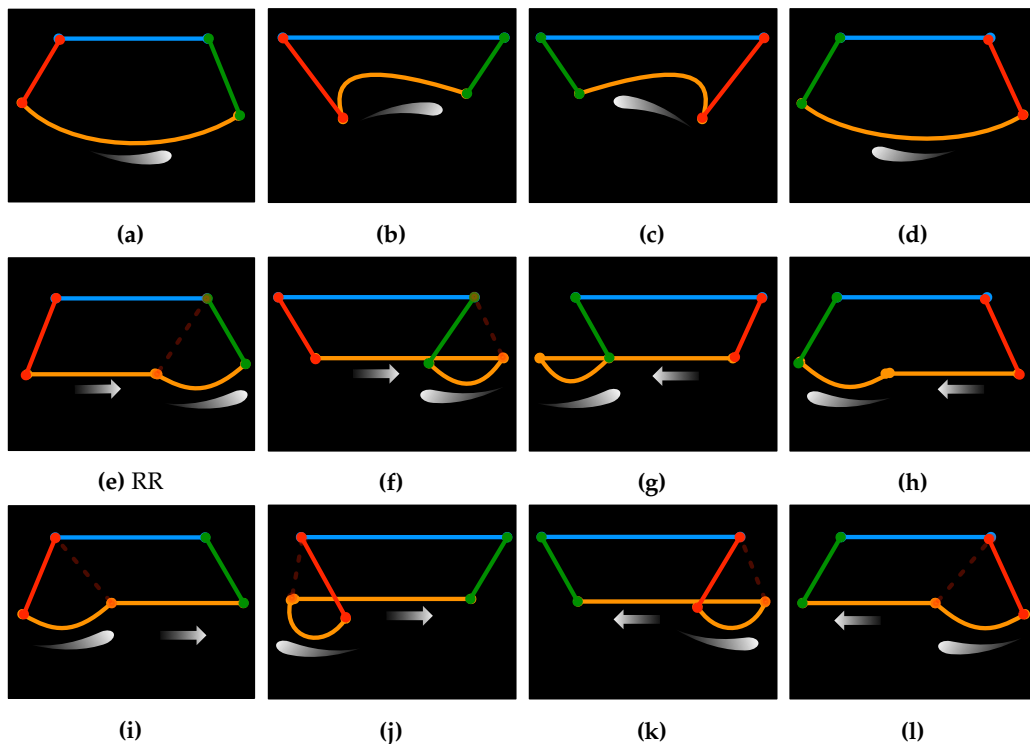


Abbildung 6.1.: Erwartete Strategien zur Lösung der Aufgaben. Parallele Strategien (a – d) und sequentielle Strategien mit Translation zu Beginn (e – h). Sequentielle Strategien bei denen zuerst die Rotation durchgeführt wird (i – l). Die Bewegungen erfolgen immer von der roten Linie zur grünen Linie. Die orange Linie deutet den Pfad des Daumens an, die blaue die des Zeigefingers. Der weiße Pfeil illustriert die Richtung der Translationsbewegung des Daumens, der *Tropfen* die der Rotationsbewegung des Daumens.

von Rotationen *im* und *gegen den Uhrzeigersinn* auf der *ipsilateralen* bzw. *kontralateralen* Seite (auf der gleichen bzw. entgegengesetzten Körperseite in Bezug zur dominanten Hand). Inhaltlich lässt sich die Anordnung von Hoggan et al. auf das Konzept uni- und bidirektionaler Bewegungen übertragen: Eine Rotation *im Uhrzeigersinn* ist linksgerichtet, eine *gegen den Uhrzeigersinn* rechtsgerichtet. Eine Translation nach rechts würde bei einem Rechtshänder mit hoher Wahrscheinlichkeit auf der ipsilateralen Seite enden, wohingegen eine Translation nach links auf der kontralateralen Seite endet. Hoggan et al. berichteten, dass Rotationen *gegen den Uhrzeigersinn* auf der kontralateralen Seite langsamer sind und zu mehr ergonomischen Fehlern führen als Rotationen *im Uhrzeigersinn*. Überträgt man dies auf das hier vorliegende Konzept, müsste eine Translation nach links mit einer rechtsgerichteten Rotation (bidirektionale Bewegung) langsamer sein als eine Translation nach links mit einer linksgerichteten Rotation (unidirektionale Bewegung).

Hypothese H3: Interaktionen mit unidirektionalen Bewegungen für Translationen und Rotationen sind effizienter als bidirektionale Bewegungen (folgt aus Hypothese H2).

6.2.1. Aufgabe

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, mithilfe der *2-Punkt-RT*-Technik ein Objekt in eine Zielposition zu bewegen (siehe Abbildung 6.2). Die Zielposition wurde durch eine vertikale Linie gekennzeichnet, auf die das Objekt verschoben werden musste. Das Zielgebiet wurde um eine definierte Toleranz erweitert, die mit einer gestrichelten Linie und grünem Hintergrund markiert wurde. Die Distanz vom Startpunkt zum Ziel wurde als kürzeste Linie zwischen den beiden Punkten definiert. Eine Linie zwischen Daumen und Zeigefinger zeigte den aktuellen Rotationswinkel an. Diese Linie musste auf eine entsprechende Linie im Zielfeld für die Rotation durch Bewegungen des Daumens rotiert werden. Die Toleranzgrenze für diese Aufgabe wurde ebenfalls mit einer gestrichelten Linie angedeutet.

Die Aufgaben sollten mit Zeigefinger und Daumen durchgeführt werden. In Abhängigkeit der Bewegungsrichtung für Translation und Rotation wurden vier Kategorien unterschieden (siehe Abbildung 6.2). Bei der Benennung der Kategorien wird vorausgesetzt, dass die Rotation mit dem Daumen und die Translation mit dem Zeigefinger durchgeführt wird.

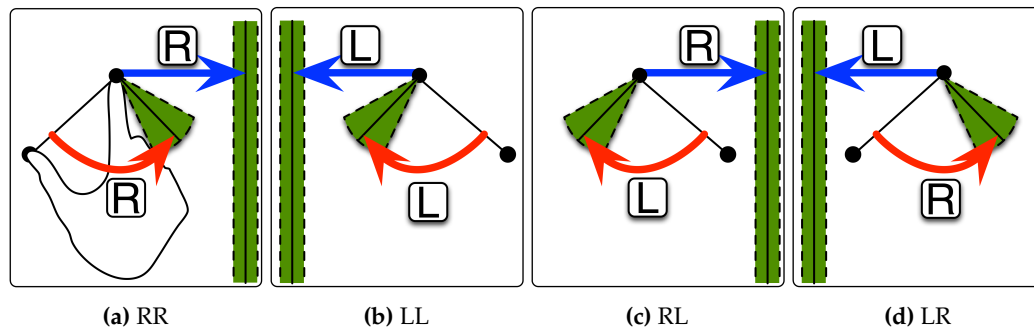


Abbildung 6.2.: Die vier Bewegungskategorien. Sie unterscheiden sich in unidirektionale (a und b) und bidirektionale Bewegungen (c und d). Der blaue Pfeil zeigt die Richtung der Translation (Zeigefinger) an. Der rote Pfeil zeigt die Rotation (Daumen) an.

1. Unidirektionale Bewegungskategorien

RR : Translation nach rechts und Rotation nach rechts (gegen den Uhrzeigersinn) (siehe Abbildung 6.2a)

LL: Translation nach links und Rotation nach links (im Uhrzeigersinn) (siehe Abbildung 6.2b)

2. Bidirektionale Bewegungskategorien

RL: Translation nach rechts und Rotation nach links (im Uhrzeigersinn) (siehe Abbildung 6.2c)

LR: Translation nach links und Rotation nach rechts (gegen den Uhrzeigersinn) (siehe Abbildung 6.2d)

6.2.2. Versuchspersonen

Die Rekrutierung der Versuchspersonen für diese Studie erfolgte zeitgleich zur Studie *Vergleich von Translation und Rotation* aus Kapitel 5, der die ersten 16 Versuchspersonen zugewiesen wurden. Die restlichen 16 Versuchspersonen (7 m, 9 w) wurden dieser Studie zugewiesen. Das Alter dieser Gruppe lag zwischen 21 und 31 mit einem Durchschnitt von 24.75 Jahren. Bis auf eine Versuchsperson waren alle Rechtshänder. Alle Versuchspersonen bedienten die Maus jedoch mit der rechten Hand. Außer einer Versuchsperson hatten alle Erfahrungen mit Single- oder Multitouch-Geräten. Acht Versuchspersonen gaben an, Touch-Geräte häufig oder sehr häufig zu verwenden, die restlichen acht gaben an, solche Geräte nur selten oder sehr selten zu verwenden. Jede Versuchsperson erhielt eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 8 €.

6.2.3. Ausrüstung und Material

Ausrüstung

Die Studie fand in einer kontrollierten Umgebung statt. Es wurde dieselbe Ausrüstung und dasselbe Setup verwendet wie in Kapitel 5. Zur Eingabe diente ein 22 Zoll Multitouch-Display der Marke 3M mit einer Auflösung von 1680x1050 Pixel und einer Reaktionsgeschwindigkeit für Berührungspunkte von < 6 ms. Das Display wurde ebenfalls in einem Winkel von 50° vor den Versuchspersonen auf einem Tisch platziert.

Material

Das Material bestand aus verschiedenen Konfigurationen für die vier Bewegungskategorien. Die Konfigurationen basieren auf unterschiedlichen Distanzen bzw. Winkel und Toleranzen für Translation sowie Rotation. Eine komplette Kombination aller Werte untereinander führt zu einer schnell ansteigenden Anzahl möglicher Konfigurationspaare. Aus diesem Grund wurden die Werte sowohl für Translation als auch für Rotation auf zwei begrenzt. Für jede Konfiguration wurde der Schwierigkeitsindex (Index of Difficulty, *ID*) nach der Shannon-Formel berechnet (siehe Gleichung 2.3 in Abschnitt 2.2.1, Seite 23). Die Reihenfolge der Trials wurde mit demselben Algorithmus erstellt wie in Kapitel 5 (siehe Abschnitt 5.2.3, Seite 121). Tabelle 6.1 listet die verschiedenen *ID* für jede Teilkonfiguration auf.

Translation				Rotation			
	Distanz	Toleranz	ID		Winkel	Toleranz	ID
±	12.7 cm	0.8 cm	4.08	±	50°	4°	2.18
±	4.8 cm	0.8 cm	2.81	±	50°	12°	1.12
±	12.7 cm	1.6 cm	3.16	±	130°	4°	3.35
±	4.8 cm	1.6 cm	2.00	±	130°	12°	2.02

Tabelle 6.1.: Konfigurationen für Translation und Rotation. ± stehen für die Bewegungsrichtungen nach links (–) und nach rechts (+). Die Kombination aller Werte miteinander ergab 64 verschiedene Konfigurationspaare (Gesamtkonfigurationen).

6.2.4. Versuchsplan

Die 16 verschiedenen Grundkonfigurationen wurden jeweils für Translation und Rotation einmal nach links (–) und einmal nach rechts (+) ausgeführt. Somit ergaben sich insgesamt 64 verschiedene Gesamtkonfigurationen, die jeweils viermal wiederholt wurden. Demnach führte jede Versuchsperson 256 Trials durch, die in vier Blöcke unterteilt waren. Analysiert wurden somit insgesamt 4096 Datensätze:

$$\begin{array}{r} 16 \text{ Versuchspersonen} \\ \times 4 \text{ Blöcke} \\ \times 64 \text{ Trials pro Block} \\ \hline = 4096 \text{ Datensätze} \end{array}$$

Als Design wurde ein *Within-Subject-Design* mit einer unabhängigen Variablen gewählt. Die unabhängige Variable bestand aus den verschiedenen Konfigurationen für die einzelnen Aufgaben (siehe Tabelle 6.1).

Als abhängige Variablen wurden folgende Werte gemessen:

1. Distance Time (*DT*): Zeitspanne zwischen Start des Trial bis zum Zeitpunkt, an dem alle Objekte im Zielbereich sind.
2. Reaction Time (*RT*): Zeitspanne zwischen Präsentation der Aufgabe und Beginn der Aufgabe. Als Beginn wurde der Zeitpunkt gemessen, an dem entweder die Rotation oder die Translation zuerst begann.
3. Fehlerrate

6.2.5. Durchführung

Zur Vorbereitung absolvierten alle Versuchspersonen eine Übungsphase mit 48 Trials. Zwischen den vier Blöcken zu je 64 Trials erfolgte jeweils eine Pause von 15 Sekunden. Es war den Versuchspersonen jedoch erlaubt, jederzeit eine Pause einzulegen, sofern sie dies für notwendig erachteten.

Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, die Aufgaben so schnell, aber mit so wenigen Fehlern wie möglich durchzuführen. Während der Übungsphase wurde die Fehlerquote angezeigt, damit die Versuchspersonen ein Gefühl für ihre Performanz und ihre Fehler bekamen. Die Anzeige sollte sie motivieren und die Fehlerquote senken. Während der Hauptphase wurde die Fehlerquote jedoch nicht mehr angezeigt.

Ein Trial wurde gestartet, sobald der Finger den Cursor für den Pivotpunkt auf dem Multitouch-Display berührte. In diesem Moment wechselte die Farbe der Objekte von weiß zu blau. Sie wurden grün, sobald der zweite Finger auf dem Objekt für die Rotation platziert wurde. Die Zeitmessung begann jedoch erst wenn eines der Objekte, entweder unter dem

Zeigefinger oder dem Daumen, bewusst verschoben wurde. Als eine bewusste Verschiebung wurde definiert, wenn das Objekt um mindestens 5 mm bewegt wurde. Dieser Wert stammt aus Voruntersuchungen, in denen Versuchspersonen Angaben dazu machten, wann sie den Eindruck hatten, ein Objekt verschoben zu haben. In diesen Voruntersuchungen empfanden die Versuchspersonen zudem einen fixen Abstand als zu starr und unbequem, was zu vielen Fehlern durch verkrampte Finger und ungewolltes Abheben führte. Deshalb war der Abstand zwischen Daumen und Zeigefinger flexibel, was eher einer realen Verwendung entspricht.

Ein Trial wurde äquivalent zur Studie aus Kapitel 5 (siehe Abschnitt 5.2.5, Seite 124) bewertet. Demnach gab es drei Möglichkeiten:

1. **Erfolg:** Ein Trial wurde als erfolgreich gewertet, wenn sich das Objekt beim Beenden des Trial durch die Versuchspersonen innerhalb des Zielbereiches befand. Die Beendigung eines Trial wurde ausgelöst, indem der Zeigefinger vom Multitouch-Display abgehoben wurde. Dies wurde mit einem grünen Häkchen und einem hochfrequenten Ton quittiert (siehe Abbildung 6.3a). Eine neue Konfiguration erschien erst, nachdem eine Konfiguration erfolgreich durchgeführt worden war.
2. **Fehler:** Als Fehler galt, wenn sich das Objekt bei Abschluss des Trial außerhalb des Zielbereiches befand. In diesem Fall erschien ein rotes Kreuz und ein mittelhoher Ton ertönte (siehe Abbildung 6.3b). Die Konfiguration wurde solange wiederholt, bis sie erfolgreich durchgeführt wurde.
3. **Abbruch:** Ein Trial wurde als Abbruch gewertet, wenn der Finger angehoben wurde, ohne dass die Objekte bewegt wurden. Dies geschah beispielsweise, wenn die Versuchspersonen den ersten Finger aufsetzten und sofort wieder abhoben, um ihn zu trocknen. Abbrüche wurden den Versuchspersonen mit einem gelben Ausrufezeichen und einem dumpfen Ton signalisiert (siehe Abbildung 6.3c). In diesem Fall wurde dieselbe Konfiguration wiederholt, bis sie erfolgreich abgeschlossen wurde.

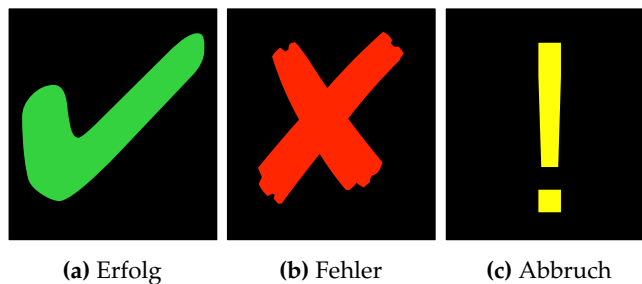


Abbildung 6.3.: Feedbackvarianten an die Versuchspersonen nach einem Trial.

Nach den Aufgaben wurden die Versuchspersonen gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Darin wurde erfragt, welche Vorerfahrungen sie hatten, welche Konfigurationen bzw. Richtungen sie am schwierigsten fanden und auf welche Probleme sie gestoßen sind. Ebenso sollten sie bewerten, welche Konfiguration für sie am leichtesten war und welche sie am ermüdendsten empfanden.

6.3. Ergebnisse

6.3.1. Effizienz

Die Effizienz wurde anhand der Ausführungszeiten bestimmt. Quantitativ war die effizienteste Bewegungskategorie *RL* ($M = 2.45\text{ s}$, $SD = 0.85\text{ s}$) gefolgt von *RR* ($M = 2.51\text{ s}$, $SD = 0.77\text{ s}$). Die langsamste war *LL* ($M = 2.89\text{ s}$, $SD = 1.08\text{ s}$) nach *LR* ($M = 2.60\text{ s}$, $SD = 0.96\text{ s}$). Die Durchschnittszeiten M sind in Sekunden angegeben.

Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab einen signifikanten Haupteffekt *Translationsrichtung*. Rechtsgerichtete Bewegungen sind schneller als linksgerichtete ($F(1, 15) = 15.01$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.50$). Weder die Rotation noch die Interaktionen zwischen Rotation und Translation zeigten einen signifikanten Effekt (beide $F_s(1, 15) < 2.59$, $p_s > .13$, $\eta_s^2 < 0.15$).

Ein zweiseitiger *t-Test* zeigt keinen signifikanten Unterschied der Effizienz zwischen unidirektionalen ($M = 2.49\text{ s}$, $SD = 0.86\text{ s}$) und bidirektionalen Interaktionen ($M = 2.33\text{ s}$, $SD = 0.83\text{ s}$), $t(15) = 1.496$, $p > 0.15$.

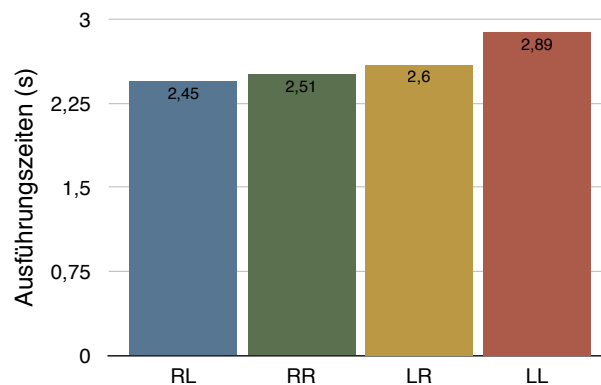


Abbildung 6.4.: Durchschnittszeiten der Bewegungskategorien in Sekunden. Sie dienen als Indikator der Effizienz.

6.3.2. Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ist die Zeitspanne zwischen Präsentation der Aufgabe und Beginn der Aufgabenausführung. Da es den Versuchspersonen erlaubt war, zwischen den Aufgaben Pausen einzulegen, und diese Zeiten nicht aufgezeichnet wurden, mussten eventuelle Pausen aus den Daten herausgefiltert werden. Deshalb wurden alle Reaktionszeiten herausgenommen, deren Wert 1.5mal höher war als der Mittelwert plus Standardabweichung. Dies waren etwa 4.9% der Daten.

Eine Analyse der Mittelwerte für die Bewegungskategorien zeigt die niedrigste Reaktionszeit bei unidirektionalen Interaktionen: *RR* ($M = 0.11\text{ s}, SD = 0.04\text{ s}$) und *LL* ($0.10\text{ s}, SD = 0.04\text{ s}$). Die höchste Reaktionszeit weisen die bidirektionalen Interaktionen *RL* ($M = 0.13\text{ s}, SD = 0.06\text{ s}$) und *LR* ($0.12\text{ s}, SD = 0.06\text{ s}$) auf (siehe Abbildung 6.5).

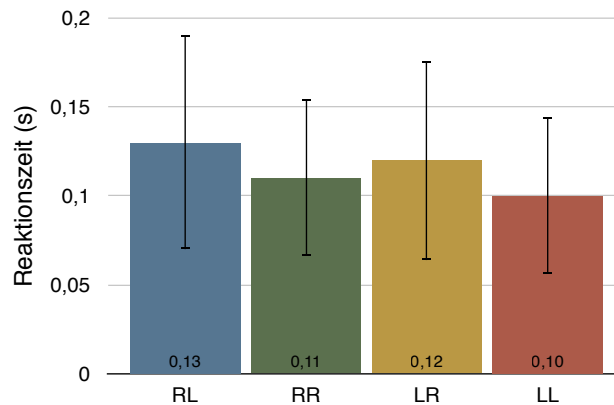


Abbildung 6.5.: Durchschnittszeiten der Reaktionszeit. Ein Vergleich der Mittelwerte für die Reaktion zeigt eine niedrigere Reaktionszeit für die unidirektionalen Interaktionen (*RR*, *LL*) gegenüber den bidirektionalen Interaktionen (*RL*, *LR*). Die Standardabweichungen sind als Balken markiert.

Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt einen signifikanten Haupteffekt *Translationsrichtung* ($F(1, 15) = 9.12, p < 0.01, \eta^2 = 0.378$) sowie eine signifikante Interaktion von *Translationsrichtung* und *Rotationsrichtung* ($F(1, 15) = 6.94, p < 0.02, \eta^2 = 0.316$). Abbildung 6.6 zeigt, dass es sich dabei um eine disordinale Interaktion handelt. Dadurch ist der Haupteffekt für die *Translationsrichtung* inhaltlich nicht interpretierbar. Vergleicht man jedoch die Mittelwerte, wird deutlich, dass unidirektionale Bewegungen kürzere Reaktionszeiten haben als bidirektionale Bewegungen.

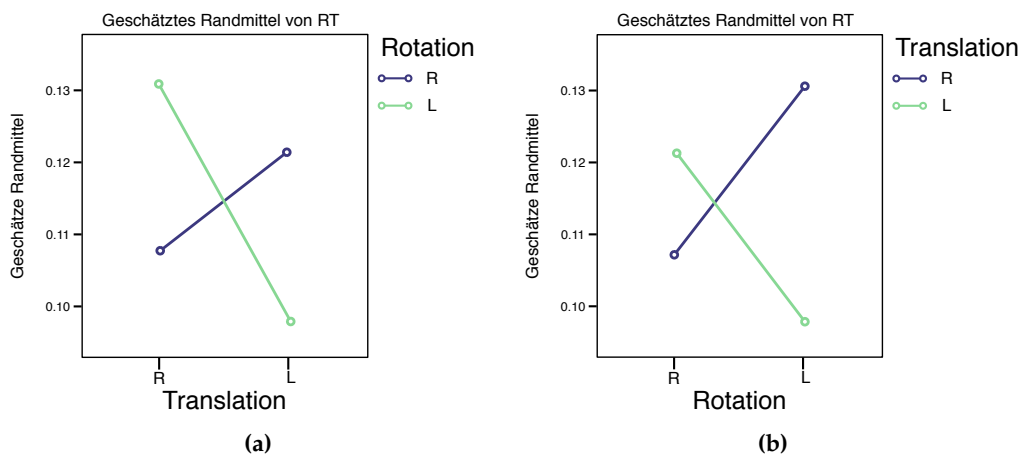


Abbildung 6.6.: Interaktionsplot. Bei der Interaktion zwischen Faktor *Translationsrichtung* und *Rotationsrichtung* kommt es zu einer disordinalen Interaktion. Unidirektionale Interaktionen haben dadurch kürzere Reaktionszeiten als bidirektionale Interaktionen.

6.3.3. Regressionsanalyse

Zum Vergleich von Performanz und Effizienz wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Zusätzlich diente sie der Überprüfung der Ergebnisse aus Kapitel 5 in Bezug auf das Vorhersagemodell von Stoelen und Akin (2010). Deshalb wurde deren Methode verwendet. Die Werte für Translation und Rotation stammen aus der Studie von Kapitel 5. Unter der Annahme, dass diese aufaddiert werden können, wurden die Ausführungszeiten von Translation und Rotation aufaddiert. Ebenso die zugehörigen *ID*. Anhand dieser *künstlich* erzeugten Werte, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Deren Ergebnisse sind als *blaue* Werte (*T+R*) in Abbildung 6.7 zu sehen. Da in der vorherigen Studie nur Rechtsbewegungen und Rotationen *gegen den Uhrzeigersinn* durchgeführt wurden, wurden bei der Regressionsanalyse nur Konfigurationen von *RR* betrachtet. Die real gemessenen Werte für *RR* aus dieser Studie sind *orange* markiert.

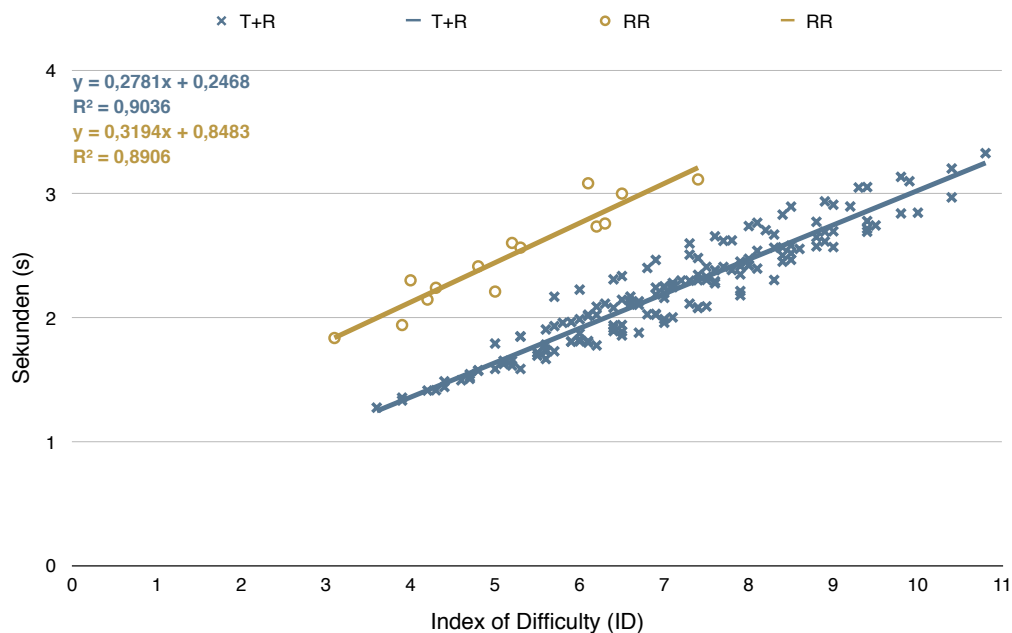


Abbildung 6.7.: Regressionsanalyse. Die Regressionsgeraden der real gemessenen Wert für *RR* (orange) und den aufaddierten Werten von Translation und Rotation (*T+R*, blau) aus der vorherigen Studie aus Kapitel 5.

Das Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt für *T+R* eine Steigung von 0.28 s/bit und einen Schnittpunkt bei 0.25 s . Die Steigung von *RR* beträgt 0.32 s/bit mit einem Schnittpunkt bei 0.85 s . Ein Vergleich mit der Steigung des Modells von Stoelen und Akin zeigt, dass letzteres um 12.5% unter den real gemessenen Werten liegt. Der Schnittpunkt liegt mit 71% deutlich unter dem Schnittpunkt von *RR*. Betrachtet man die Korrelationskoeffizienten, so weisen die theoretischen Werte von *T+R* mit $R^2=0.90$ eine ähnliche Korrelation auf, wie die real gemessenen Werte für *RR* mit einem Wert von $R^2=0.89$.

6.3.4. Strategien

Neben der quantitativen Analyse der Performanz wurde eine qualitative Analyse zu den Strategien der Versuchspersonen durchgeführt. Zur Analyse der Strategien wurden die Muster der Bewegungspfade manuell von zwei Personen gesichtet und kategorisiert. Bis auf wenige Ausnahmen waren die Bewegungspfade eindeutig kategorisierbar. Uneindeutige Muster, wurden mit einer weiteren Person diskutiert und bewertet. Dies konnten beispielsweise sehr kurze Pfade sein oder solche bei denen der Pfad des Daumens recht flach war. Dadurch waren die Rotationsbewegungen schwer zu erkennen.

Neben den erwarteten Strategien wurden drei unerwartete Strategien von den Versuchspersonen verwendet: *Parallel-by-Rotation*, *Sequential-Rotation-At-Start-And-End* und *Changing-Pivot*. Insgesamt konnten sechs unterscheidbare Strategien identifiziert werden, die die Versuchspersonen zur Erreichung ihres Ziels genutzt haben (siehe Abbildung 6.8):

1. *Parallel*: Eine parallele Ausführung von Translation und Rotation durch paralleles Verschieben des Zeigefingers und Rotieren des Daumens (Abbildung 6.8a).
2. *Parallel-by-Rotation*: Ähnlich wie bei *Parallel* mit dem Unterschied, dass der Zeigefinger durch Rotieren bewegt wurde (Abbildung 6.8b).
3. *Sequentiel-Translation-First*: Eine parallele Translation durch Verschieben des Zeigefingers und des Daumens mit finalem Rotieren des Zeigefingers im letzten Abschnitt (Abbildung 6.8c).
4. *Sequentiel-Rotation-First*: Ein Rotieren im ersten Abschnitt und anschließend eine parallele Verschiebung von Zeigefinger und Daumen (Abbildung 6.8d).
5. *Sequentiel-Rotation-At-Start-And-End*: Rotieren des Daumens im ersten Abschnitt gefolgt durch eine parallele Verschiebung von Daumen und Zeigefinger mit erneutem Rotieren des Daumens im letzten Abschnitt. *Sequentiel-Rotation-At-Start-And-End* kam nur sehr selten vor und ergibt sich aus einer Mischung aus den Strategien *Sequentiel-Translation-First* und *Sequentiel-Rotation-First* (Abbildung 6.8e).
6. *Changing-Pivot*: Rotieren des Zeigefingers um den Daumen als Pivot-Finger (Abbildung 6.8f).

Verteilung der Strategien

Wie sich die identifizierten Strategien auf die vier Bewegungskategorien verteilen, zeigt Tabelle 6.2. Dies lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Hauptstrategie war für LL die sequentielle Strategie *Sequentiel-Rotation-First*: 52 % aller Trials von LL wurden mit dieser Strategie gelöst. Konfigurationen mit kleinen Rotationen wurden jedoch eher parallel durchgeführt (51 %). Bei großen Winkeln war hingegen *Sequentiel-Rotation-First* mit 62 % die meist genutzte Strategie. Bei RR entschieden sich die Versuchspersonen für die parallele Strategie (*Parallel*) und verwendeten diese in 55 % der Trials. Am zweithäufigsten wurde bei RR *Sequentiel-Rotation-First* mit 26 % verwendet.

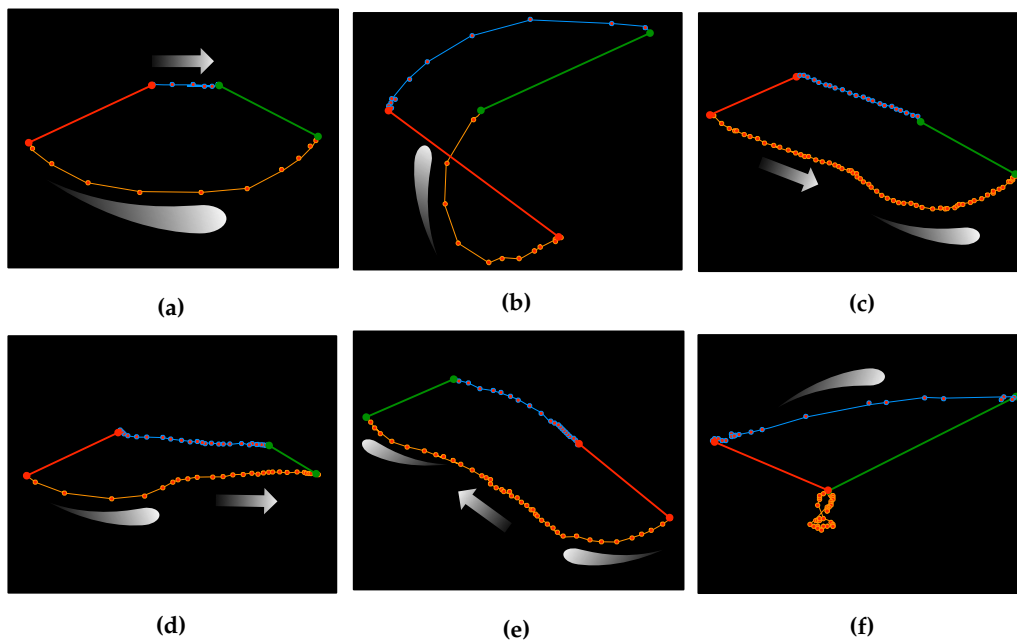


Abbildung 6.8.: Beispielpfade der identifizierten Strategien. Die Bewegungen erfolgen von rot zu grün. Die gelben Linien illustrieren die Pfade des Daumens, die blauen die des Zeigefingers. Der weiße Pfeil illustriert die Richtung der Translationsbewegung des Daumens, der Tropfen die der Rotationsbewegung des Daumens.

Bei bidirektionalen Bewegungen *RL* und *LR* wechselten die Versuchspersonen häufiger zwischen den Strategien. Die Hauptstrategien für *RL* und *LR* waren *Parallel*, *Sequential-Rotation-First* und *Changing-Pivot*. *Parallel-by-Rotation* wurde weitgehend als Lösung ignoriert (4%). Für kurze Translations-Bewegungen in *LR* waren *Parallel* und *Parallel-by-Rotation* die häufigsten (40%). Für weite Abstände war *Changing-Pivot* mit 40% die favorisierte Strategie vor *Sequential-Rotation-First* mit 31%. Bei *RL* war die am meisten genutzte Strategie für kurze Entfernungen *Parallel* (49%) und *Parallel-by-Rotation* (9%). Für weite Abstände wurde *Changing-Pivot* 51% am häufigsten verwendet. *Sequential-Rotation-At-Start-And-End* wurde mit knapp 1% am seltensten verwendet.

Strategie	<i>RR</i>	<i>RL</i>	<i>LR</i>	<i>LL</i>
Parallel	56 %	25 %	12 %	39 %
Parallel-by-Rotation	0 %	9 %	28 %	1 %
Sequential-Translation-First	18 %	4 %	4 %	5 %
Sequential-Rotation-First	26 %	28 %	33 %	52 %
Sequential-Rotation-At-Start-And-End	0 %	0 %	0 %	3 %
Changing-Pivot	0 %	34 %	23 %	0 %

Tabelle 6.2.: Prozentuale Verteilung der Strategien auf die Bewegungskategorien.

Änderung der Strategien

Die Anzahl der Strategien variiert in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bewegungskategorien. Beispielsweise wurden bei *RL* im Durchschnitt 2.48 verschiedene Strategien verwendet, wohingegen bei *RR* nur 1.70 Strategien verwendet wurden. Die Verteilung der Strategiewechsel ist in Abbildung 6.9 zu sehen.

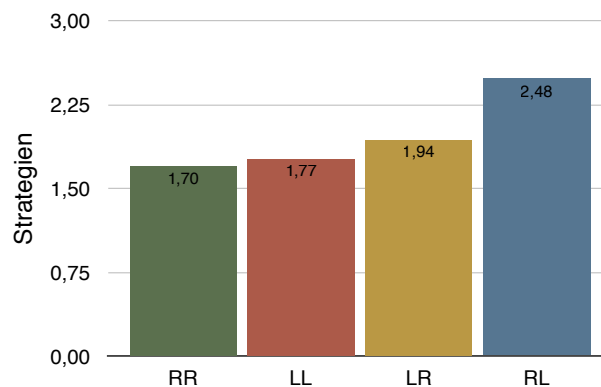


Abbildung 6.9.: Die Verteilung der Strategiewechsel auf die Bewegungskategorien. Bei *RR* wurden beispielsweise im Schnitt 1.7 verschiedene Strategien zur Lösung eingesetzt.

Ein zweiseitiger *t*-Test zeigt mehr Strategiewechsel bei bidirektionalen Interaktionen (*RL*, *LR*) ($M = 2.16, SD = 0.56$) im Vergleich unidirektionalen Interaktionen (*RR*, *LL*) ($M = 1.75, SD = 0.42$), $t(15) = 3.66, p < 0.002$.

6.3.5. Fragebogen

Die Auswertung der Fragebögen ergab, dass *LL* als die schwierigste und ermüdendste Bewegungskategorie beurteilt wurde, gefolgt von *LR* und *RL*. Als einfachste Bewegungskategorie empfanden die Versuchspersonen *RR*. Zudem gaben fünf Versuchspersonen an, dass sie bidirektionale Bewegungen als unangenehmer und „komischer“ empfanden.

Eine Versuchsperson äußerte sich direkt über ihre Strategie: „Manche Bewegungen fielen geringfügig leichter, da ich eine bessere Strategie gefunden habe, um die Aufgabe zu lösen.“. Eine weitere Versuchsperson empfand „*RL* und *LR* problematischer“, weil diese schwerer zu kontrollieren war.

6.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus dieser Studie konnten für die *2-Punkt-RT*-Technik zusammenfassend folgende Erkenntnisse gewonnen werden: Hinsichtlich der Effizienz zeigt sich, dass rechtsgerichtete Bewegungen effizienter als linksgerichtete Bewegungen sind; unidirektionale Bewegungen sind jedoch nicht effizienter als bidirektionale Bewegungen. In Bezug auf die Schwierigkeit zeigt

sich, dass sich das Zusammenspiel der Bewegungsrichtung von Translation und Rotation auf die Reaktionszeit auswirkt. Linksgerichtete Bewegungen haben kürzere Reaktionszeiten als rechtsgerichtete Bewegungen; unidirektionale Bewegungen zeigen signifikant niedrigere Reaktionszeiten als bidirektionale Bewegungen. Es werden weniger Lösungsstrategien bei unidirektionalen Bewegungen als bei bidirektionalen Bewegungen verwendet. Die Versuchspersonen empfinden rechtsgerichtete Bewegungen als einfacher und weniger ermüdend als linksgerichtete Bewegungen. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigen, dass die Vorhersage der Ausführungszeiten mit dem Modell von Stoelen und Akin (2010) stark von den real gemessenen Daten abweicht.

6.4. Diskussion

Die geringeren Ausführungszeiten von rechtsgerichteten Bewegungen zeigen deren höhere Effizienz bei der *2-Punkt-RT*-Technik. Dies bestätigt *Hypothese H1*. Im subjektiven Urteil der Versuchspersonen zeigt sich, dass diese Bewegungen als angenehmste Bewegungskategorie empfunden werden. Dies unterstreicht die objektiven Werte. Arbeiten zur Effizienz und Planungszeit sind zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Wang et al. (1998) stellten bei kombinierten Bewegungen aus Translation und Rotation fest, dass die Translation der kritische Teil der Interaktion ist, weil diese sich stärker auf die gesamte Ausführungszeit auswirkt als die Rotation. Dies zeigt sich in dieser Studie darin, dass lediglich ein Haupteffekt der Translationsrichtung festgestellt werden konnte. Zudem berichten Zhao et al. (2015), dass bei ihren Untersuchungen zur *2-Punkt-RT*-Technik, Bewegungen nach rechts schneller waren als Bewegungen nach links. Jedoch ist im Gegensatz zu der hier durchgeführten Studie anzumerken, dass sie mit der Skalierung einen zusätzlichen Faktor untersucht haben. Dadurch können ihre Ergebnisse nur unter Vorbehalt mit den vorliegenden verglichen werden. Allerdings konnten Olafsdottir et al. (2014) in ihren Untersuchungen zur Planungszeit ebenfalls feststellen, dass Rechtsbewegungen leichter sind als Linksbewegungen. Sie interpretieren die Planungszeit als Indikator für die Schwierigkeit einer Aufgabe und gehen davon aus, dass schwierigere Aufgaben eine längere Planungszeit erfordern, was sich in einer höheren Reaktionszeit niederschlägt. Dies besagt auch das Konzept der *ID*. Damit können die Ergebnisse von Olafsdottir et al. auch die höhere Effizienz von rechtsgerichteten Interaktionen erklären. Die Lese- und Schreibrichtung sowie die Rechtshändigkeit der Versuchspersonen könnte die höhere Effizienz von Rechts- gegenüber Linksbewegungen innerhalb dieser Studie verursachen. Zukünftige Arbeiten sollten daher insbesondere Linkshänder und Versuchspersonen mit anderer Lese- und Schreibrichtung berücksichtigen.

Neben der höheren Reaktionszeit ist auch die Anzahl der eingesetzten Strategien bei bidirektionalen Bewegungen wichtig. Denn dabei wenden sie deutlich mehr unterschiedliche Strategien im Vergleich zu unidirektionalen Bewegungen an (2.48 vs. 1.70 Strategien). Dies zeigt, dass den Nutzern in diesen Fällen eindeutige Lösungsstrategien fehlen. Bei unidirektionalen Bewegungen hingegen scheinen die Nutzer eine klare Vorstellung zu haben, wie sie die Aufgabe am effizientesten lösen. Betrachtet man die Erkenntnisse zur Strategiekennzahl vor dem Hintergrund der Reaktionszeit, kann gefolgert werden, dass bidirektionale

Interaktionen bei der *2-Punkt-RT*-Technik für Nutzer schwieriger und somit weniger intuitiv sind. Mehr Strategien und eine längere Planungszeit bedeuten eine erhöhte Schwierigkeit. Dies wird von den Aussagen der Versuchspersonen gestützt, die solche Bewegungen als unangenehm und „komisch“ empfanden. Somit kann *Hypothese 2* angenommen werden, die von einer höheren Schwierigkeit von bidirektionalen Interaktionen ausgegangen ist.

In diesem Kontext muss auch die Arbeit von Hoggan et al. (2013b) gesehen werden. Sie untersuchten sowohl die Effizienz als auch die Ergonomie von statischen Rotationen. Dabei verwendeten sie eine Version der *2-Punkt-RT*-Technik ohne Skalierung und Translation. Sie berichteten, dass rechtsgerichtete Rotationen (*gegen den Uhrzeigersinn*) auf der kontralateralen Seite langsamer sind und dabei mehr ergonomische Fehler wie Kontaktverlust oder Nicht-Ausführbarkeit der Konfiguration auftreten. Auf der ipsilateralen Seite gilt dasselbe bei linksgerichteten Rotationen (*im Uhrzeigersinn*). Mit dem Ausschluss der Translation fehlt bei Hoggan et al. eine dynamische Komponente, bei der die Rotation aus einer Bewegung heraus erfolgt. Deren Ergebnisse werden hier jedoch mit der Untersuchung von kombinierten Bewegungen aus Translation und Rotation unter dynamischen Bedingungen bestätigt. Denn auch hier konnte gezeigt werden: Bewegungen auf die kontralaterale Seite sind in Kombination mit einer rechtsgerichteten Rotation schwieriger und weniger intuitiv.

Hypothese H2 postuliert, dass die Kombination der Richtungen von Translation und Rotation eine Rolle für die Schwierigkeit spielt. Die disordinale Interaktion zwischen Translations- und Rotationsrichtung bestätigt, dass sich beide Faktoren auf die Reaktionszeit auswirken, auch wenn die Art des Zusammenhangs inhaltlich nicht interpretierbar ist. Der Vergleich der Mittelwerte lässt jedoch den Schluss zu, dass unidirektionale Bewegungen (RR und LL) eine geringere Reaktionszeit benötigen als bidirektionale (RL und LR). Somit können unidirektionale Bewegungen nach Olafsdottir et al. als weniger schwierig angesehen werden. Sie sind somit intuitiver und weisen eine höhere Usability auf. Aus der Annahme heraus, dass unidirektionale Bewegungen weniger schwierig sind (*Hypothese H2*), wurde in *Hypothese H3* angenommen, dass unidirektionale Bewegungen auch effizienter sind als bidirektionale Bewegungen. Eine einfache, intuitive Bewegung sollte direkt und ohne Probleme, d.h. mit einer geringen Ausführungszeit, auszuführen sein. Dies konnte in der vorliegenden Studie jedoch nicht bestätigt werden. Somit muss *Hypothese H3* verworfen werden.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass eine Verfälschung der Reaktionszeiten in dieser Studie nicht auszuschließen ist. Bei Linksbewegungen ist der Weg für Rechtshänder zum Objekt kürzer als bei Rechtsbewegungen. Denn dabei liegen die Objekte auf der ipsilateralen Seite, bei Rechtsbewegungen auf der kontralateralen Seite. Daher wird eine längere Zeit benötigt, um das Objekt zu erreichen. Olafsdottir et al. umgingen dieses Problem, indem sie die Startposition zentriert vor die Versuchspersonen platzierten. Dadurch war der Weg zum Startpunkt für Links- und Rechtsbewegungen gleich weit. Eine weitere Möglichkeit, die Reaktionszeit präziser zu bestimmen, wäre das Stoppen der Zeit, sobald der Arm bewegt wird, um die Aufgabe zu lösen. Dies könnte über ein Kommando der Versuchsperson geschehen oder über eine neutrale Fläche, auf der der Finger ruhen muss, bevor eine neue Konfiguration gezeigt wird. Das Abheben des Fingers signalisiert den Beginn der Aufgabenausführung. Damit ließe sich die Zeitspanne der Planungszeit eindeutig bestimmen.

Die Versuchspersonen beurteilen die Bewegungskategorie *RR* sehr positiv. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass sie hierbei überwiegend parallele Strategien verwenden, wohingegen bei den anderen Bewegungskategorien häufiger sequentielle Strategien eingesetzt werden. Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, kann eine parallele Interaktion bzw. die Veränderung von mehreren DoF dazu führen, dass die Nutzer sich als kompetenter und effizienter empfinden.

Wang et al. (1998) führten ihre Untersuchungen mit einem realen Würfel durch. Sie beobachteten, dass in den meisten Fällen zuerst die Translation, dann die Rotation ausgeführt wurde. Dies entspricht der *Sequential-Translation-First-Strategie*. Innerhalb der hier vorgestellten Studie zeigte sich ein anderes Bild: Diese Strategie wurde nur in 8 % der Trials eingesetzt; die *Sequential-Rotation-First-Strategie* jedoch in 35 % der Fälle. Demnach wird bei Multitouch-Interaktionen die Rotation als erste Bewegung bevorzugt. Das Beginnen mit der Rotation könnte dazu dienen, das Handgelenk noch vor der Translation in eine angenehmere Position zu bringen. Dies verdeutlicht, dass Strategien von den Interaktionstechniken abhängig sind.

Von den drei überraschend aufgetretenen Strategien ist unter dem Aspekt des Nutzerverhaltens insbesondere die *Changing-Pivot-Strategie* interessant. Der Wechsel des Pivot-Fingers – von Zeigefinger auf Daumen als Drehpunkt bei der Rotation – könnte durch ergonomische Aspekte oder individuelle Präferenzen in Bezug auf den Führungsfinger zustande kommen. Dies könnte weitere Anhaltspunkte für das Design von Rotationstechniken liefern. Weitere Arbeiten müssten deshalb die Gründe identifizieren, warum die Versuchspersonen ihren Pivotfinger wechseln. Eventuell könnten sie feststellen, ob der Daumen der bessere Pivotfinger ist oder die individuelle Präferenz von bestimmten Konfigurationen abhängt.

Die hier diskutierten Ergebnisse könnten Interaktionsdesignern helfen, Elemente für Interaktionen sinnvoll zu platzieren und Vorhersagen zu existierenden Interfaces zu machen. Beispielsweise könnten adaptive Interfaces diese Ergebnisse nutzen, um Interface-Elemente automatisch zu platzieren, Parameter selbst anzupassen (Rotationsgeschwindigkeit) oder die Sicht verbessern, um die Perspektive für Translation-Rotations-Bewegungen zu optimieren.

Die großen Unterschiede zwischen den realen Werten und den auf Basis des Modells von Stoelen und Akin (2010) vorhergesagten Werten bestätigen, was bereits Kapitel *Vergleich von Translation und Rotation* zeigt: Die Erweiterung von Fitts' Gesetz nach Stoelen und Akin ist für Multitouch nicht zulässig. Eine mögliche Alternative könnte jedoch der Ansatz von Accot und Zhai (2003) sein. Sie haben die Definition der *ID* angepasst, um die Breite und Höhe des Zielobjekts als 2-dimensionales Objekt zu kodieren, indem sie *ID* in zwei Teile trennten. Unabhängige Studien haben gezeigt, dass dieser Ansatz zu einer besseren Approximation führt als 1-dimensionale Formeln (Hoffmann et al., 2011). Daher wäre eine separate Kodierung der Richtung von Rotation und Translation in separate Dimensionen eine Möglichkeit, die Auswirkungen beider Anteile besser abzubilden. Eine mögliche Repräsentation könnte folgendermaßen aussehen:

$$MT = a + b * \log_2 \sqrt{\left(\frac{A_t}{W_t}\right)^2 + \alpha * \left(\frac{A_r}{W_r}\right)^2} \quad (6.1)$$

mit A_t für die Distanz der Translation und W_t für die Toleranz bzw. Breite. A_r bezeichnet die Distanz der Rotation und W_r die entsprechende Toleranz bzw. Breite für die Rotation. α bezeichnet die Gewichtung für die unterschiedliche Schwierigkeit der Bewegung. Beispielsweise würde *RL* eine niedrigere Gewichtung erhalten als *LL*. Dieser Vorschlag müsste in einer separaten Studie näher untersucht werden.

Für die eingangs formulierten Forschungsfragen können daher folgende Schlüsse gezogen werden:

F5: Spielt die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation bei Multitouch eine Rolle für die Effizienz?

Nur die Bewegungsrichtung von Translation spielt eine Rolle für die Effizienz der Gesamtbewegung bei der *2-Punkt-RT*-Technik. Kombinierte Bewegungen sind am effizientesten, wenn sie nach rechts verlaufen.

F8: Wirkt sich die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation auch auf die Schwierigkeit der Interaktionstechnik aus?

Werden bei der *2-Punkt-RT*-Technik beide Finger unidirektional bewegt, sind sie für die Nutzer einfacher zu lösen, was auf eine hohe Intuitivität und Usability schließen lässt. Demnach wirken sich die Bewegungsrichtungen der involvierten Finger auf die Schwierigkeit der Interaktionstechnik aus.

6.5. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Studie war die Untersuchung der Schwierigkeit und Effizienz von Translation und Rotation. An kombinierten Translations- und Rotationsbewegungen wurde überprüft, wie sich die unterschiedlichen Richtungen der involvierten Finger innerhalb der Gesamtbewegung auf diese beiden Faktoren auswirken. Als Interaktionstechnik wurde die *2-Punkt-RT*-Technik verwendet, da sie als die Standardinteraktionstechnik auf dem Multitouch für die gleichzeitige Translation und Rotation gilt (Hancock et al., 2006; Hoggan et al., 2013b). Die involvierten Finger (Daumen und Zeigefinger) mussten dabei entweder in die gleiche Richtung (unidirektional) oder in entgegengesetzte Richtungen (bidirektional) bewegt werden. Als Indikator für die Effizienz wurden dabei die Ausführungszeiten gemessen. Die Reaktionszeit – die Zeitspanne zwischen Präsentation der Aufgabe und dem Beginn ihrer Ausführung – gilt als Indikator der Schwierigkeit (Olafsdottir et al., 2014). Zusätzlich wurde bei der Bestimmung der Schwierigkeit auch die Anzahl der zur Aufgabelösung eingesetzten Strategien berücksichtigt. Die Strategie beschreibt, wie die Nutzer beim Lösen der Aufgabe vorgehen. Beispielsweise können Translation und Rotation entweder parallel oder sequentiell ausgeführt werden. Je mehr Strategien eingesetzt werden und je länger die Reaktionszeit, desto schwieriger ist die Interaktion. Dies zeigt, dass die Versuchspersonen zunächst unsicher sind, wie die Aufgabe optimal zu lösen ist und deshalb ihre Vorgehensweise während der Ausführung ändern müssen. Zusammenfassend kann gezeigt

werden, dass bidirektionale Bewegungen von Daumen und Zeigefinger zur Durchführung der Translation (Zeigefinger) und Rotation (Daumen) schwieriger sind. Dies führte bei den Versuchspersonen zu signifikant mehr eingesetzten Strategien als bei unidirektionalen Bewegungen. Bestätigt wurde diese Beobachtung durch die erhöhten Reaktionszeiten bei bidirektionalen Bewegungen. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass kombinierte Bewegungen aus Translation und Rotation, bei denen die Translation nach rechts gerichtet ist, effizienter und weniger ermüdend sind als Bewegungen nach links.

Da die Erkenntnisse aus diesem Kapitel auf die entscheidende Bedeutung von Translation hinweisen, behandelt das nächste Kapitel eine Studie, die sich ausschließlich mit Translationsbewegungen befasst.

Performanz und Ergonomie von Translation

„Jede Bewegung verläuft in der Zeit und hat ein Ziel.“

Aristoteles, 384–322 v. Chr., griechischer Philosoph

Die Effizienz bzw. die Performanz und die Ergonomie sind wichtige Faktoren zur Sicherung der Akzeptanz von neuen Eingabegeräten und Interaktionstechniken. Bisher wurden Vergleiche von Interaktionstechniken oder Interfacedesigns auf Basis von Fitts' Definition der Performanz oder dem *Mean-of-means Throughput (TP)* durchgeführt (Soukoreff und MacKenzie, 2004). Dieses Kapitel zeigt erstmals, dass die bisherigen Formulierungen von Fitts' Gesetz nicht ausreichend sind, um Effizienz und Performanz von Interaktionstechniken und Interfaces adäquat zu bewerten und zu vergleichen. Zusätzlich zeigt sich, dass kürzere kinematische Ketten performanter sind als lange kinematische Ketten. Ebenso deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der Einsatz kurzer kinematischer Ketten zu einer reduzierten Ermüdung bei der Arbeit an Multitouch-Displays führen könnte. Inhalte dieses Kapitels wurden auf der internationalen Konferenz *Human-Computer Interaction 2015 (INTERACT 2015)* publiziert und mit dem *Best Paper Award* ausgezeichnet (Nguyen und Kipp, 2015).

7.1. Einleitung

Kapitel Schwierigkeit und Effizienz von Rotation und Translation konnte zeigen, dass die Translation der entscheidende Faktor für die Effizienz einer kombinierten Interaktionstechnik aus Rotation und Translation ist. Deshalb befasst sich dieses Kapitel mit einer systematischen Analyse der Translation auf einem Multitouch-Display. Folgende Forschungsfragen sollen hierbei beantwortet werden: Ist die Originalformulierung von Fitts' Gesetz ausreichend, um Interaktionszeiten für Multitouch adäquat vorherzusagen? (F4). Kann die schnelle Ermüdung bei der Nutzung von Multitouch verhindert werden? (F7).

Es soll insbesondere analysiert werden, welche veränderbaren Faktoren Einfluss auf die Performanz von Translationen haben. Untersucht werden deshalb die Faktoren: Startpunkt der Bewegung, Bewegungsrichtung, Bewegungsdistanz und die Neigung des Multitouch-Display. Derzeitige Modelle, die zur Untersuchung von Performanz und Effizienz verwendet werden, basieren auf Fitts' Gesetz und berücksichtigen nur die Distanz zum Ziel und die Zielgröße. Die hier vorgestellte Studie basiert auf Fitts' Studien und untersucht, ob die beiden Faktoren der Originalformulierung von Fitts' Gesetz ausreichend sind, um die Ausführungszeiten auf Multitouch adäquat vorherzusagen (*F4*). Wären sie entgegen jetziger Betrachtungsweisen nicht ausreichend, so müssten die Formeln zur Berechnung der Performanz angepasst werden. Studien aus früheren Arbeiten fanden bereits Hinweise darauf, dass Fitts' Formulierung nicht ausreichend sein könnten. Sie stellten in verschiedenen Bereichen des Multitouch-Display unterschiedliche Effizienz fest (Bi et al., 2011; Weiss et al., 2010). Fitts' Modell sagt hingegen konstante Zeiten vorher. Dies wurde bisher noch nicht systematisch untersucht. Solche Untersuchungen sind allerdings notwendig, um konkrete Faktoren zu identifizieren und zu evaluieren.

Zusätzlich sollen Bewegungsanalysen der Versuchspersonen Aufschluss geben, ob die Bewegungsausführung der Nutzer am Multitouch-Display für die Ermüdung bzw. das sogenannte *Gorilla-Arm-Syndrom* verantwortlich ist. Denn dieses Syndrom gehört zu den am häufigsten genannten ergonomischen Problemen bei der Arbeit an Multitouch-Displays (Bachynskyi et al., 2015; Carmody, 2010; Hincapié-Ramos et al., 2014; Loi, 2013; Watson et al., 2013). Die Ergebnisse sollen helfen, Ansätze zu finden, wie eine schnelle Ermüdung bei der Arbeit an Multitouch-Displays verhindert werden kann (*F6*).

7.2. Studie

Die hier vorgestellte Studie ist nach Sichtung der früheren Arbeiten die erste Arbeit, die die Performanz von Translation mit der *Dragging*-Technik auf einem Multitouch-Display systematisch unter Berücksichtigung mehrerer Faktoren untersucht. Dafür wurde das Display in 20 Zonen bzw. Startpunkte unterteilt. Die Performanz wurde in Abhängigkeit des Startpunktes, der Richtung und der Distanz der Bewegung analysiert.

Das Ziel dieser Studie ist die Überprüfung folgender Hypothesen:

Hypothese H1: Die Performanz bei einem horizontal geneigten Multitouch-Display ist höher als bei einem vertikal geneigten Display. Bi et al. (2011) konnten dies für kleine Zonen zeigen, Pedersen und Hornbæk (2012) für große Displays.

Hypothese H2: Rechtsbewegungen sind performanter als Linksbewegungen. Dies wird aus den Ergebnissen aus Kapitel 6 abgeleitet. Diese zeigten eine höhere Effizienz bei Rechtsbewegungen für kombinierte Bewegungen aus Translation und Rotation. Ähnliche Ergebnisse erzielten auch Zhao et al. (2015) für die Interaktionstechnik RST, bei der gleichzeitig Rotation, Skalierung und Translation involviert sind.

Hypothese H3: Aufwärtsbewegungen sind bei horizontaler Neigung aus der unteren Hälfte performanter als Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte. Weiss et al. (2010) berichten einen leichten Trend zugunsten von Aufwärtsbewegungen bei einer horizontalen Multitouch-Oberfläche. Zhao et al. (2015) konnten für RST-Aufgaben zeigen, dass Aufwärtsbewegungen und Bereiche, die nah am Körper liegen, schneller sind als Abwärtsbewegungen oder Bereiche, die weiter entfernt sind.

Hypothese H4: Bei einem vertikal geneigten Multitouch-Display sind Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte performanter als Aufwärtsbewegungen aus der unteren Hälfte. Cockburn et al. (2012) stellten eine höhere Reibung bei Aufwärtsbewegungen an vertikalen Displays fest, sodass diese Bewegungen weniger effizient sind.

Hypothese H5: Bewegungen aus der linken Hälfte sind performanter als Bewegungen aus der rechten Hälfte. Dies ergibt sich analog zu H2.

Hypothese H6: Kurze kinematische Ketten sind performanter als lange kinematische Ketten (Balakrishnan und MacKenzie, 1997; Langolf et al., 1976; Rosenbaum et al., 1991).

Hypothese H7: Das Arbeiten am vertikal geneigten Multitouch-Display ist anstrengender (ermüdender) als am horizontal geneigten Multitouch-Display. Watson et al. (2013) konnten dies für konkrete Aufgaben feststellen.

Hypothese H8: Kurze kinematische Ketten sind weniger ermüdend als lange kinematische Ketten. Hincapié-Ramos et al. (2014) konnten mit ihrem Maß feststellen, dass das Arbeiten mit einem ausgestreckten Arm zu einer schnelleren und höheren Ermüdung führt.

7.2.1. Aufgabe

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, mit der *Dragging*-Technik (Cockburn et al., 2012) ein Fadenkreuz in eine Zielfläche zu bewegen. Dieses Fadenkreuz befand sich innerhalb einer grauen Kreisfläche. Die Zielfläche wurde durch eine Kreisfläche mit einem gestrichelten Rand dargestellt (siehe Abbildung 7.1a). Der Durchmesser der Zielfläche betrug 1.5 cm. Sobald die zu verschiebende Fläche mit dem Finger ausgewählt wurde, änderte sich die Farbe von grau zu weiß. Dabei wurde auch das Fadenkreuz schwarz (siehe Abbildung 7.1b).

Ein Trial wurde beendet und gewertet, wenn der Finger vom Multitouch-Display abgehoben wurde. Der Trial wurde als erfolgreich gewertet, wenn sich die Mitte des Fadenkreuzes innerhalb der Zielfläche befand. Eine vollständige Überdeckung der Fadenkreuzfläche und der Zielfläche war daher nicht erforderlich. Der Erfolg wurde mit der Einblendung eines grünen Hakens signalisiert (Abbildung 7.1c). Eine einfache Überschneidung der Kreisflächen, bei dem sich das Fadenkreuz außerhalb der Zielfläche befand, wurde als Fehlversuch gewertet (siehe Abbildung 7.1d). In diesem Fall erschien ein *trauriger Smiley*. Im Falle eines Fehlversuchs wurde die Konfiguration am Ende wiederholt. Damit wurde sichergestellt, dass jede Konfiguration mindestens einmal erfolgreich durchgeführt wurde. Ein Ton si-

gnalisierte das Beenden eines Trial. Dieser Ton unterschied sich in Abhängigkeit eines erfolgreichen und misslungenen Trial. Der Beginn eines neuen Trial wurde ebenfalls mit einem Ton signalisiert.

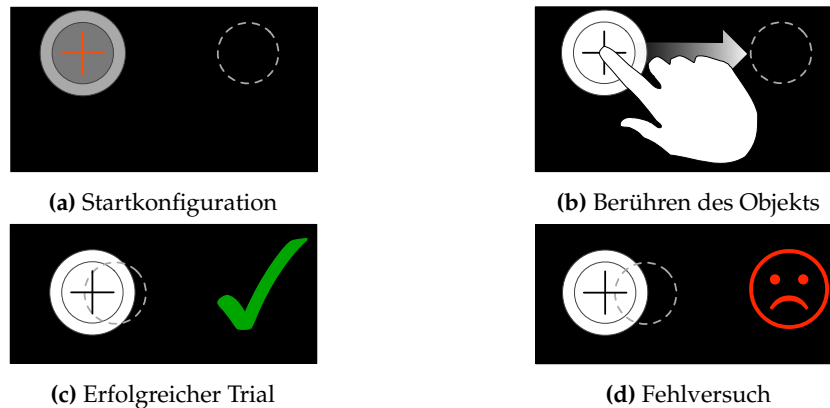


Abbildung 7.1.: Ablauf eines Trial. Die Startkonfiguration (a) erscheint, die Versuchsperson berührt das Objekt und bewegt es in Richtung Ziel, hier illustriert durch den grauen Pfeil, der jedoch im Trial nicht angezeigt wurde (b). Beim Treffen der Zielfläche wird Erfolg zurückgemeldet (c), beim Verfehlen des Ziels wird ein Fehlversuch signalisiert (d).

7.2.2. Versuchspersonen

Die Rekrutierung der Versuchspersonen erfolgte über Aushänge auf dem Universitätsgelände sowie private und universitäre E-Mail-Listen für Doktoranden und Studenten. Teilgenommen haben insgesamt 16 Personen im Alter zwischen 19 und 33 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 24 Jahren. Die Geschlechtsverteilung lag bei 7 männlichen und 9 weiblichen Versuchspersonen. 13 der Versuchspersonen waren Rechtshänder und 3 Linkshänder. Alle bedienten sowohl Maus als auch eigene Multitouch-Geräte mit der rechten Hand. Der berufliche Hintergrund der Versuchspersonen war stark heterogen. Nur die Hälfte der Versuchspersonen hatte einen technischen Berufshintergrund (z. B. Informatik o. ä.). Dadurch konnte eine Verfälschung der Ergebnisse durch eine zu homogene Gruppe wie z. B. durch eine zu technik-affine Gruppe entgegengesteuert werden.

15 der Versuchspersonen gaben an, ihr Smartphone mehrfach täglich bzw. mehrfach pro Woche zu nutzen. Arbeitsbildschirme mit Touch-Funktion (Single- oder Multitouch) wurden hingegen nicht oder nur sehr selten genutzt. 14 Versuchspersonen gaben an, solch ein Gerät noch nie benutzt zu haben. Je eine Versuchsperson gab an, es selten bzw. gelegentlich zu nutzen. Jede Versuchsperson erhielt eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 10 € für die Teilnahme an der Studie.

7.2.3. Ausrüstung und Material

Ausrüstung

Eingesetzt wurde dasselbe Multitouch-Display, das auch in den Kapiteln Kapitel 5 und 6 eingesetzt wurde. Die Software der Versuchsumgebung lief während der Untersuchung auf einem iMac und wurde in *Java 8* sowie *JavaFX* umgesetzt. Die Übertragung der erfassten Berührungspunkte wurde über das *TUIO*-Protokoll realisiert (Kaltenbrunner et al., 2005). Zusätzlich wurden für die Videoaufnahmen drei Webcams mit HD Auflösung verwendet (Abbildung 7.4). Ausführungen zur Anordnung finden sich in Abschnitt 7.2.5.

Material

Jede Konfiguration bzw. jeder Bewegungspfad wurde über einen Start- und einen Endpunkt definiert. Beide wurden durch zwei Kreisflächen dargestellt. Die Kreisfläche des Endpunktes hatte im Gegensatz zur Kreisfläche des Startpunktes, keinen durchgezogenen, sondern einen gestrichelten Rand (siehe Abbildung 7.1a). Die Berechnung der Zielpunkte erfolgte in Relation zum Startpunkt mit Hilfe von vier Streckenlängen (2,5 cm, 5 cm, 10 cm und 20 cm) und acht Winkeln (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° und 315°). Um ein möglichst detailliertes Bild von der Performanz der Interaktion über das gesamte Display zu erhalten, sollte das Raster möglichst viele Startpunkte enthalten. Zusätzlich wurden Richtung und Bewegungslänge der Konfigurationen variiert. Da sich durch die Kombination von Winkel und Distanzen bereits 32 verschiedene Zielpunkte pro Startpunkt ergaben (siehe Abbildung 7.2a), musste die Anzahl der Startpunkte eingeschränkt werden. Aus diesem Grund wurde ein Raster von 4×5 mit 20 Startpunkten über das Display gelegt (siehe Abbildung 7.2b).

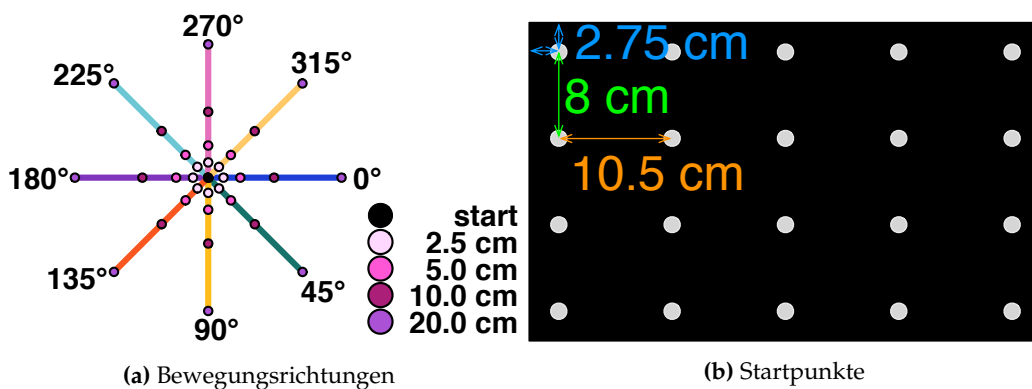


Abbildung 7.2.: Distanzen, Winkel und Startpunkte. Definition der 32 Konfigurationen über acht Winkel und vier Distanzen (markiert als Kreise auf den Linien) (a). Verteilung der Startpunkte (weiße Kreisflächen) über das gesamte Display (b).

Endpunkte, die direkt am Displayrahmen lagen, wurden ausgelassen, da sie ohne ein *Abbremsen* der Bewegung getroffen werden können. Durch Ausschluss dieser Punkte soll sichergestellt werden, dass alle Punkte die gleichen Bedingungen in der Erreichbarkeit haben. Deshalb wurden nur Zielpunkte berücksichtigt, die von den Rändern in die Display-

mitte zeigen oder sich noch innerhalb der Displayfläche befanden. Abbildung 7.3a zeigt die verwendeten Richtungen für die jeweiligen Startpunkte. Die Farben der Richtungen orientieren sich an Abbildung 7.2a. Zusätzlich fielen weitere Zielpunkte raus, die sich aufgrund der Distanzen außerhalb der Monitorfläche befanden (siehe Abbildung 7.3b). Durch diese Eingrenzungen reduzierte sich die Anzahl von möglichen 640 auf 388 Konfigurationen. Jede dieser Konfigurationen wurde in einem Trial sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Neigung ausgeführt.

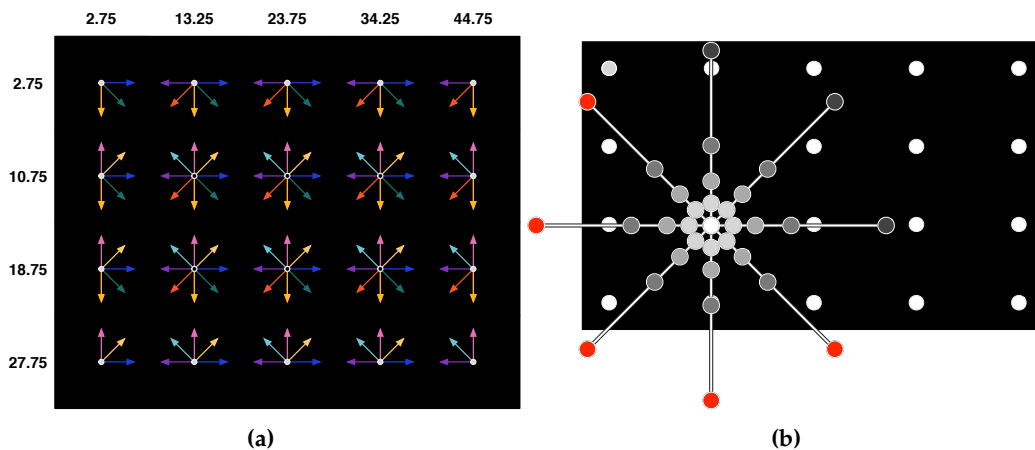


Abbildung 7.3.: Bewegungsrichtungen der Startpunkte. An den Rändern werden nur die Bewegungsrichtungen berücksichtigt, die nicht aus dem Display herauszeigen (a). Endpunkte, die sich nicht mehr auf dem Display befinden (rot) oder zu nah am Displayrand liegen (orange) werden herausgefiltert (b).

7.2.4. Versuchsplan

Als Design wurde ein *Within-Subject-Design* mit zwei unabhängigen Variablen gewählt:

1. Displayneigung (horizontal, vertikal)
2. Konfigurationen (Startpunkt, Richtung und Distanz)

Die Startneigung wurde alternierend abgewechselt. Jede Bedingung wurde mit einem neuen randomisierten Konfigurationssatz ausgeführt. Dieser wurde jeweils in 4 Blöcke unterteilt. Bei der Gesamtwertung wurden vorhergehende Übungsversuche nicht berücksichtigt. Analysiert wurden demnach insgesamt 12416 Datensätze:

$$\begin{array}{r}
 16 \text{ Versuchspersonen} \\
 \times 2 \text{ Displayneigungen} \\
 \times 4 \text{ Blöcke} \\
 \times 97 \text{ Trials pro Block} \\
 \hline
 = 12416 \text{ Datensätze}
 \end{array}$$

Als abhängige Variable wurden folgende Werte gemessen:

1. Distance Time (*DT*): Zeitspanne zwischen Selektion des Objektes bis zum Eindringen Kreuzes in den Toleranzbereiches der Zielfläche
2. Correction Time (*CT*): Zeitspanne zwischen Eindringen des Kreuzes in den Toleranzbereich und Abheben des Fingers
3. Fehlerrate

CT und Fehlerrate wurden gemessen um die *effective ID* (ID_e) und *mean-of-means Throughput* (*TP*) nach Soukoreff und MacKenzie (2004) zu berechnen (siehe auch Gleichung 2.8 in Abschnitt 2.2.2, Seite 31).

7.2.5. Durchführung

Die Studie wurde in einem Versuchslabor durchgeführt. Während der Studie saßen die Versuchspersonen auf einem nicht drehbaren Stuhl vor dem Multitouch-Display. Der nicht drehbare Stuhl sollte eine möglichst einheitliche Positionierung des Oberkörpers bei allen Versuchspersonen sicherstellen. Das Multitouch-Display wurde in zwei Neigungen eingesetzt: vertikal und horizontal. In der vertikalen Neigung wurde das Multitouch-Display wie ein normaler Arbeitsmonitor auf einem Schreibtisch positioniert. Dadurch konnten die Versuchspersonen die Berührungsoberfläche mühelos und angenehm erreichen und bedienen (siehe Abbildung 7.4a). Bei der horizontalen Neigung (*Tisch-Stellung*) wurde das Multitouch-Display auf einen kleinen Tisch gestellt, sodass sich die Oberfläche auf einer Höhe von 73 cm befand. Diese Höhe entsprach der Höhe des Schreibtisches (siehe Abbildung 7.4b).

Für die Videoaufnahmen wurden drei Webcams mit HD-Auflösung verwendet. Kamera 1 wurde über dem Display platziert. Um die Interaktionen aufzuzeichnen, wurde Kamera 2 oberhalb der rechten Schulter platziert. Für eine Seitenansicht wurde Kamera 3 links von den Versuchspersonen aufgestellt. Abbildung 7.4 illustriert den gesamten Versuchsaufbau der Kameras für beide Displayneigungen. In Abbildung 7.6 sind die Aufzeichnungen aus den drei Blickwinkeln zu sehen.

Die Instruktionen wurden schriftlich erteilt (siehe Anhang D). Nachdem die Versuchspersonen die Instruktionen gelesen hatten, konnten sie noch offene Fragen klären. Die Versuchsleitung war die ganze Studiendauer über anwesend und überwachte die Durchführung. Die Versuchspersonen durften weder Hand noch Finger zwischen den Ausführungen wechseln. Außer diesen Restriktionen war es ihnen freigestellt, wie sie die Aufgaben lösen. Dies sollte sicherstellen, dass die Versuchspersonen die Aufgaben intuitiv und natürlich lösen. Auch wurde ihnen nicht mitgeteilt, dass ihre Bewegungen analysiert werden.

Die Untersuchung bestand aus verschiedenen Teilen: Je zwei Übungsphasen sowie je zwei Hauptteile pro Displayneigung. Die Übungsphasen bestehen aus jeweils 50 Trials mit 50 Übungskonfigurationen in zufälliger Reihenfolge. Der Satz mit den Konfigurationen für die Übungsphase war für jede Versuchsperson gleich. Jede Displayneigung hatte einen eignen

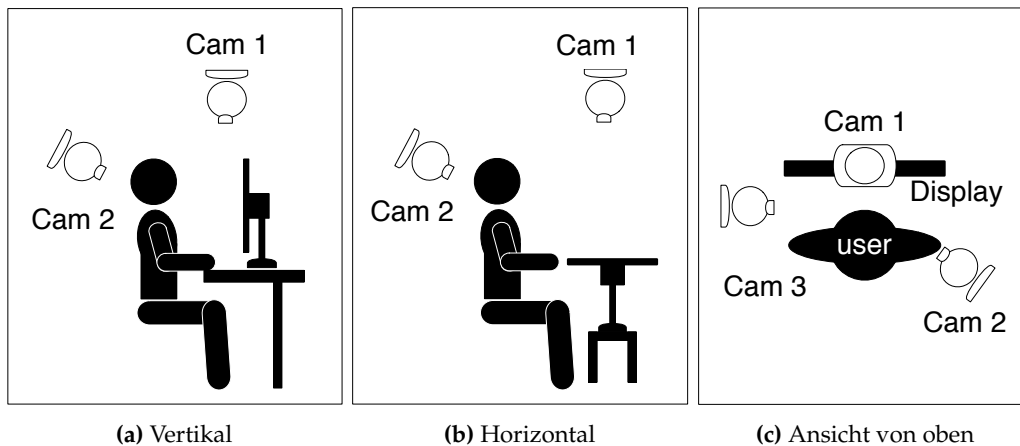


Abbildung 7.4.: Kamera-Setup. Die Kameras wurden direkt über den Versuchspersonen sowie schräg hinter ihrer Schulter platziert (a, b). Eine weitere Kamera wurde links von den Versuchspersonen aufgestellt (c).

Übungssatz. Die Hauptteile beinhalten jeweils 388 Konfigurationen bzw. Trials. Dieselben Konfigurationen werden einmal in horizontaler und einmal in vertikaler Neigung des Display ausgeführt. Pro Neigung dauerte jeder Hauptteil etwa 30 Minuten. Die Reihenfolge der Trials für die Konfigurationen wurde für jede Person zufällig generiert, wobei zwei Bedingungen eingehalten wurden: Kein Startpunkt erschien in zwei direkt aufeinanderfolgenden Trials. Ebenso erschien derselbe Winkel nicht direkt zweimal hintereinander. Diese Bedingungen sollten gewährleisten, dass die Versuchspersonen keinen systematischen Vorteil aus der Reihenfolge der Trials ziehen konnten. Die endgültige Anzahl der final durchgeführten Trials in den Hauptteilen richtete sich nach der individuellen Fehlerrate, da jede Konfiguration mindestens einmal fehlerfrei ausgeführt werden musste.

Die Untersuchung begann für jede Versuchsperson mit der Übungsphase, mit deren Hilfe sich die Versuchspersonen mit dem Multitouch-Display und der Benutzung (Strategie und Fingerführung) vertraut machen sollten. Nach der Übungsphase startete der erste Hauptteil in der ersten Neigung des Multitouch-Display (vertikal oder horizontal). Die Anfangsneigung wurde über alle Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. Die Trials wurden in 4 Blöcke unterteilt, zwischen denen jeweils eine 20-sekündige Pause zur Entlastung der Versuchspersonen erzwungen wurde. Anschließend wurde eine längere Pause eingelegt und die Displayneigung gewechselt. Danach durchliefen die Versuchspersonen die zweite Übungsphase, bevor sie den zweiten Hauptteil analog zum ersten Hauptteil in der neuen Neigung absolvierten. Die Versuchspersonen konnten die Pausen zwischen den Blöcken bei Bedarf auch verlängern oder zwischen zwei Trials eine kurze Pause einlegen. Nach jedem Trial wurde der Versuchsperson ihre letzte Zeit im Vergleich zu ihrer Durchschnittszeit angezeigt, um sie zu motivieren (siehe Abbildung 7.5).

Während der Durchführung der Trials kam es häufiger zu einem unbeabsichtigten Kontaktverlust des Fingers von der Multitouch-Oberfläche. Grund dafür war häufig eine erhöhte Reibung der Finger aufgrund von Schweiß und einer erhöhten Temperatur der Multitouch-Oberfläche. Im Falle eines unbeabsichtigten Kontaktverlusts sollten die Teilnehmer der

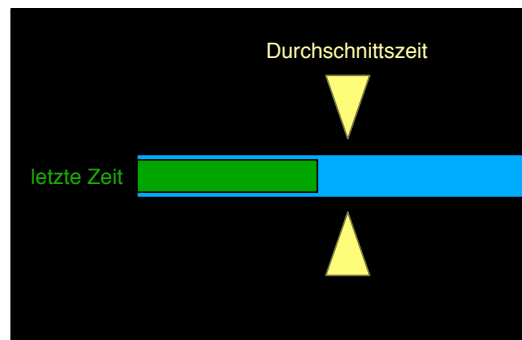


Abbildung 7.5.: Anzeige der letzten Ausführungszeit. Der grüne Balken zeigt die letzte gemessene Zeit. Die gelben Dreiecke deuten die Durchschnittszeit an.

Versuchsleitung mitteilen, ob der abgebrochene Trial beabsichtigt oder unbeabsichtigt war. Diese Trials wurden von der Versuchsleitung notiert und später aus der Wertung genommen.

Um ein differenziertes Feedback zur Multitouch-Nutzung unter den verschiedenen Bedingungen zu erhalten, füllten die Versuchspersonen direkt im Anschluss an die Untersuchung einen mehrteiligen Fragebogen aus. In einem kurzen einführenden Teil des Fragebogens wurden keine tatsächlich auswertungsrelevanten Informationen erhoben. Hier sollte den Versuchspersonen lediglich die Möglichkeit gegeben werden, sich über ihr Empfinden zu dem Versuch zu äußern (Spaß, Anstrengung, Eintönigkeit etc.)(siehe Anhang D). Sollte die lange monotone Belastung bei den Versuchspersonen zu „Frustration“ geführt haben, sollte dieser durch diese Maßnahme emotional reduziert werden. Auf diese Weise sollte das anschließende Urteil objektiviert werden.

Im ersten auswertungsrelevanten Teil sollten die Versuchspersonen fünf Fragen beantworten. Dabei sollten sie entscheiden, welche Neigung sie für eine bestimmte Kategorie auswählen würden. Als Antwortmöglichkeiten hatten sie neben den beiden Displayneigungen, eine weitere neutrale Kategorie („weder noch“). Dies ermöglicht ein differenzierteres Bild, da sich die Versuchspersonen bei Unschlüssigkeit nicht für eine Neigung entscheiden mussten.

Im zweiten Teil des Fragebogens sollten die Teilnehmer folgende fünf Aussagen zur horizontalen Neigung bzw. Tisch-Stellung und vertikalen Neigung bewerten:

1. „Ich würde die Tisch-Stellung für diese und ähnliche Aufgaben empfehlen.“
2. „Mir machte das Arbeiten mit der Tisch-Stellung Spaß.“
3. „Ich finde das Arbeiten mit der Tisch-Stellung besser als das Arbeiten mit der vertikalen Stellung.“
4. „Das Arbeiten mit der Tisch-Stellung empfand ich als anstrengend.“
5. „Ich würde die Tisch-Stellung für die alltägliche Arbeit bevorzugen.“

Analog zu den Fragen zur Tisch-Stellung (horizontal) wurden die Fragen auch für die vertikale Neigung formuliert und anhand einer *Likert*-Skala abgefragt. Sie beinhaltete fünf Antwortmöglichkeiten („Stimme voll und ganz zu.“, „Stimme eher zu.“, „Teils, teils.“, „Stimme eher nicht zu.“, „Stimme gar nicht zu.“). Im Durchschnitt dauerte die Untersuchung inklusive Befragung ca. 75 Minuten pro Versuchsperson.

Beobachtungen durch die Versuchsleitung

Vor, während und nach der Datenerhebung wurden alle Versuchspersonen von derselben Versuchsleitung betreut. Sie ging mit ihnen die schriftlichen Instruktionen durch, gab bei Bedarf Erklärungen ab und sorgte für die Einhaltung konstanter Versuchsbedingungen (Sitzposition, Abstand zum Multitouch etc.).

Während der Aufgabenbearbeitung beobachtete die Versuchsleitung die Versuchspersonen. Um die Versuchspersonen dabei nicht zu stören, erfolgte dies über einen separaten Monitor, auf dem nebeneinander die drei Kameraperspektiven zu sehen waren (siehe Abbildung 7.6). Dieser Monitor war für die Versuchspersonen selbst nicht einsehbar. Sie notierte Informationen zu den Versuchen (Fehlversuche, technische Schwierigkeiten usw.), zu Körper-, Arm-, Hand- und Fingerhaltung sowie zu individuellen Faktoren wie der gewählten Strategie oder relevanten Eigenschaften (sofern erkennbar). Zudem wurden Informationen zu häufig auftretenden Problemen und Auffälligkeiten bei bestimmten Bewegungen schriftlich festgehalten.

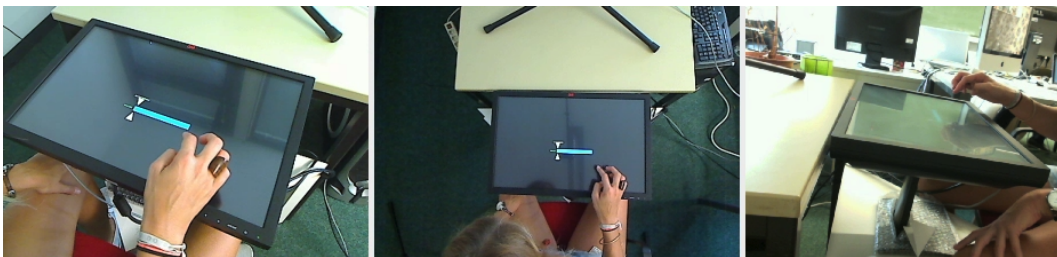


Abbildung 7.6.: Monitoransicht der Versuchsleitung. Die Versuchsleitung beobachtete die Versuchspersonen während der Untersuchung aus drei unterschiedlichen Perspektiven.

7.3. Ergebnisse

7.3.1. Performanz

Die statistische Analyse der Daten erfolgte selektiv aus einer anwendungsbezogenen Perspektive heraus. Denn es soll eine Grundlage für konkrete Design-Empfehlungen für Translationsinteraktionen bei Multitouch geschaffen werden. Deshalb wurden die Areale des Multitouch-Display in funktionelle Einheiten unterteilt, deren Performanz gegeneinander untersucht wurde (siehe Abbildung 7.7). Unterschieden werden dabei drei Einheiten:

1. **Hauptarbeitsbereich (gelb):** Er liegt im Zentrum des Multitouch-Display. Translationsbewegungen in diesem Areal sind multi-direktional und können sowohl funktional eingesetzt werden (z. B. Scrollleisten, Pop-up Menüs usw.) als auch innerhalb verschiedener Anwendungen (Bildbearbeitung, Kartennavigation etc.) relevant werden.
2. **Randbereiche (blau):** : Die rechten und linken bzw. die oberen und unteren Ränder werden oft zur Platzierung von Menüleisten (z. B. Windows Charm-Leisten) oder als Ablageflächen verwendet. Deren Aufruf erfordert Translationsbewegungen, die senkrecht zum jeweiligen Rand zur Display-Mitte hin gerichtet sind. Diese Bewegungen spielen auch bei Desktopwechseln oder bei Gesten zur Steuerung von Browser-Menüs (Tab/Seite vor/zurück usw.) und dergleichen eine Rolle.
3. **Ecken (rot):** Als Sonderfall der Randbereiche stellen die Ecken markante Ablageflächen dar. Meist werden besonders zentrale Funktionen dort platziert (z. B. Startmenüs oder Windows Startbutton). Translationsbewegungen hierbei laufen meist nach unten oder nach oben. Bei Gestenbelegung der Ecken sind auch diagonale Bewegungen denkbar.

Z11	Z12	Z13	Z14	Z15
Z21	Z22	Z23	Z24	Z25
Z31	Z32	Z33	Z34	Z35
Z41	Z42	Z43	Z44	Z45

Abbildung 7.7.: Funktionale Einteilung des Multitouch-Display. Das Display wurde in Hauptarbeitsbereich (gelb), Randbereiche (blau) und Ecken (rot) unterteilt.

Für die Ausführungszeiten gilt die Log-Normalverteilung. Viele statistische Tests setzen jedoch eine Normalverteilung der Daten voraus (Pospeschill, 2006). Der *TP* nach Soukoreff und MacKenzie (2004) ist im Gegensatz zu den Ausführungszeiten normalverteilt (siehe Abbildung 7.8). Die Analyse der Daten erfolgt deshalb anhand des *TP*. Ein *Shapiro-Wilk*-Test bestätigt die Normalverteilung auch für die vorliegenden Daten ($W = 0.9858$, $p - value = 0.8047$).

Vergleich der Displayneigungen

Ein zweiseitiger abhängiger *t*-Test zeigt, dass Translationsbewegungen auf einem horizontal geneigten Multitouch-Display ($M = 8.67 \text{ bits/s}$, $SD = 2.02 \text{ bits/s}$) die Performanz eines vertikal geneigten Multitouch-Display übertreffen ($M = 7.53 \text{ bits/s}$, $SD = 1.46 \text{ bits/s}$); $t(15) = 3.62$, $p < 0.002$, *Cohens d* = 0.907. Abbildung 7.9a zeigt den durchschnittlichen *TP*

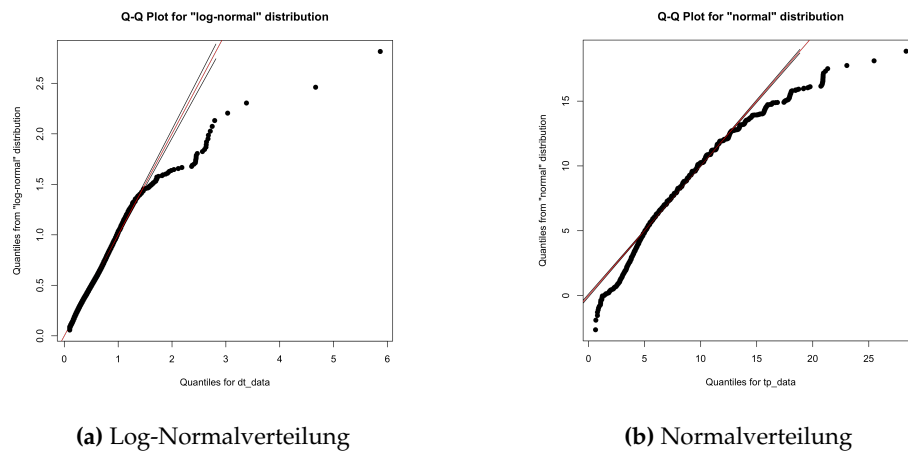


Abbildung 7.8.: Statistische Verteilung von Ausführungszeit und Throughput (TP). Ausführungszeiten sind log-normalverteilt (a). TP -Werte sind normalverteilt (b).

für horizontal (H) und vertikal (V) an. Auch die Heatmap in Abbildung 7.9 zeigt deutliche Unterschiede in der Performanz auf.

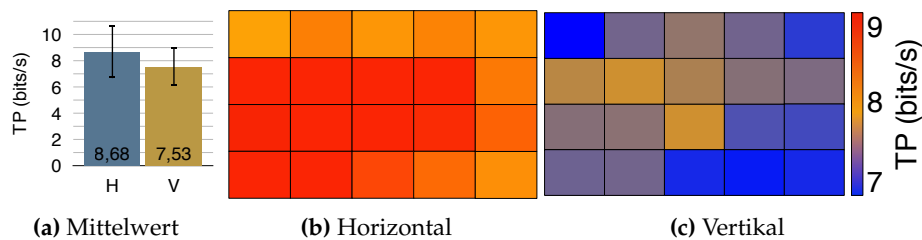
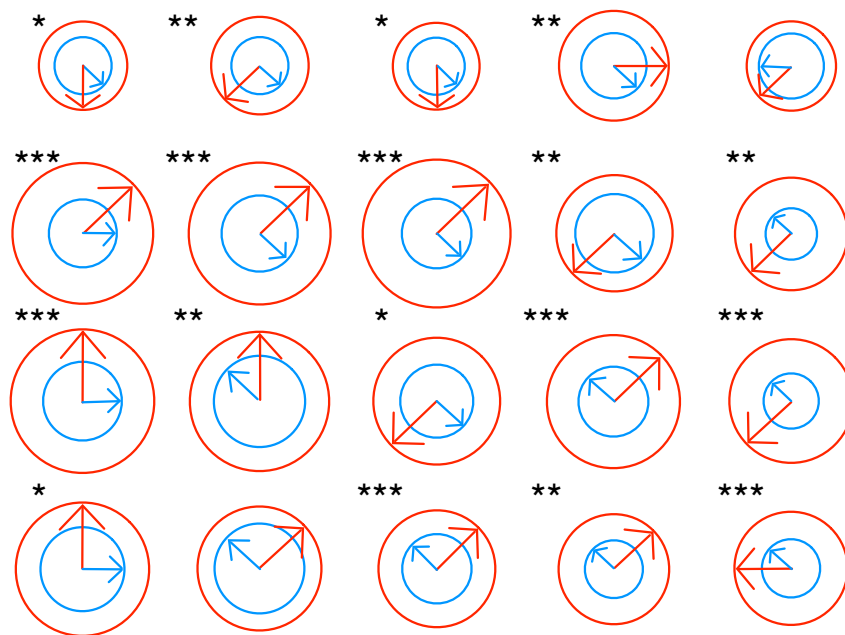


Abbildung 7.9.: Throughput-Vergleich (TP) bei horizontal und vertikal geneigtem Multitouch-Display. Das horizontal geneigte Display weist einen höheren TP auf (a). Die Heatmap der Performanz mit gleichen Skalenfaktoren, zeigt ein heterogeneres Bild bei horizontal geneigtem Multitouch-Display (b) als das vertikal geneigte Multitouch-Display (c). Rote Flächen weisen eine höhere Performanz auf, blaue Flächen haben niedrigere Performanz.

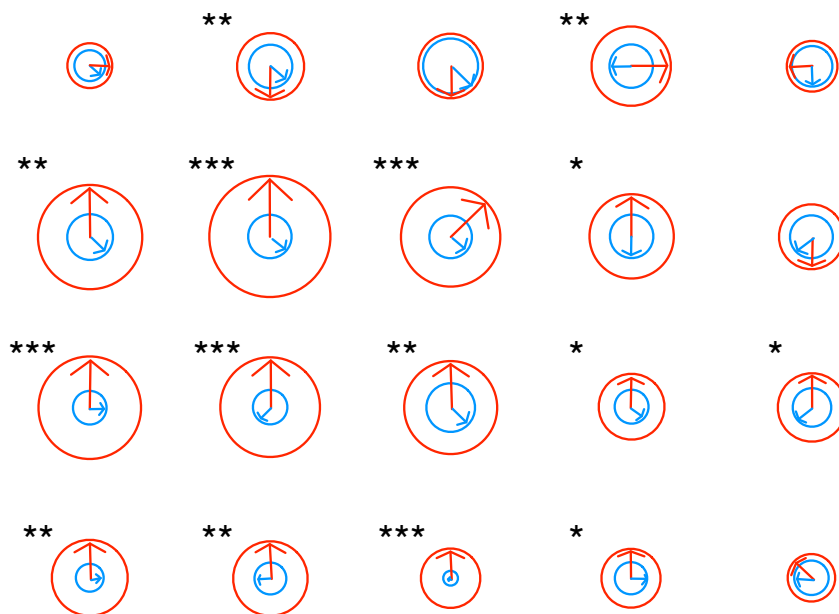
Vergleich der Bewegungsrichtungen

Die Analyse der Bewegungsrichtungen zeigt, dass bei einem horizontal geneigten Multitouch-Display Aufwärtsbewegungen (270°) aus der unteren Hälfte performanter ($M = 9.00 \text{ bits/s}$, $SD = 2.06 \text{ bits/s}$) sind als Abwärtsbewegungen (90°) aus der oberen Hälfte ($M = 8.61 \text{ bits/s}$, $SD = 2.16 \text{ bits/s}$), $t(15) = 2.21$, $p < 0.05$, $Cohens\ d = 0.553$. Bei dem vertikal geneigten Multitouch-Display ist hingegen keine Signifikanz festzustellen.

Zwar konnten weitere signifikante Unterschiede innerhalb der Bewegungsrichtungen festgestellt werden, es zeigt sich jedoch kein eindeutiges Bild, um sie sinnvoll kategorisieren zu können. Abbildung 7.10 illustriert die schnellste und langsamste Richtung in jeder Zone. Die hochgestellten Sterne zeigen das Signifikanzniveau folgendermaßen an: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.



(a) Horizontal



(b) Vertikal

Abbildung 7.10.: Vergleich der Performanz für Bewegungsrichtungen. Die Sterne zeigen das Signifikanzniveau der t -Tests zwischen den Vektoren (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$). (Anmerkung: Um den Unterschied zwischen den Richtungen deutlicher hervorzuheben, wurden die Vektoren um einen konstanten Faktor gekürzt. Der Rest wurde dann um den Faktor 200 vergrößert.)

Vergleich der Bewegungsachsen

Ein paarweiser Vergleich zwischen den Achsen zeigt zum Teil statistisch hoch signifikante Unterschiede innerhalb der Zonen. Abbildung 7.11 zeigt die Benennung der Achsen. Zum Beispiel zeigt die Achse *V* signifikante Unterschiede zu den Achsen *H* und *D2* in den Zonen *Z21*, *Z22*, *Z31*, *Z32*, *Z33*. Konkret bedeutet das: In der rechten Display-Hälfte des horizontal geneigten Display finden sich die meisten Signifikanzen auf der diagonalen Achse (*D1*); in der linken Display-Hälfte verteilen sich die Signifikanzen hingegen eher auf die vertikale Achse (*V*). Die Signifikanzen des vertikal geneigten Display sind wesentlich geringer, sodass sich insgesamt ein homogeneres Bild zeigt. Signifikanzen für die Achsen *D1* und *V* befinden sich ausschließlich in der linken Display-Hälfte. Abbildung 7.12 stellt signifikante Achsenpaarungen gegenüber. Achsenpaarungen, die keine Signifikanzen aufweisen, wurden ausgelassen.

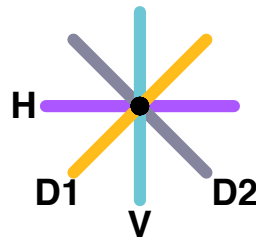
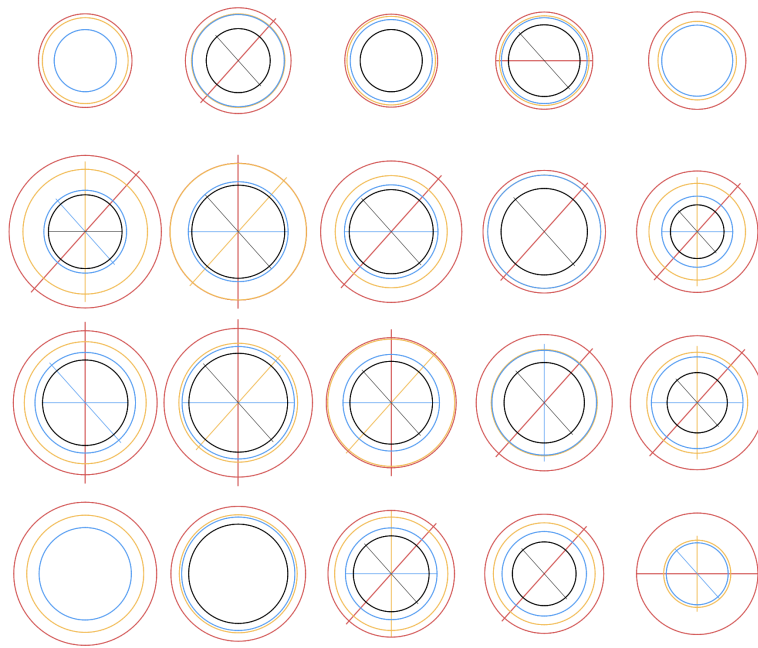


Abbildung 7.11.: Bewegungsachsen. Die acht Richtungen aus Abbildung 7.2a wurden zu vier Hauptachsen zusammengefasst.

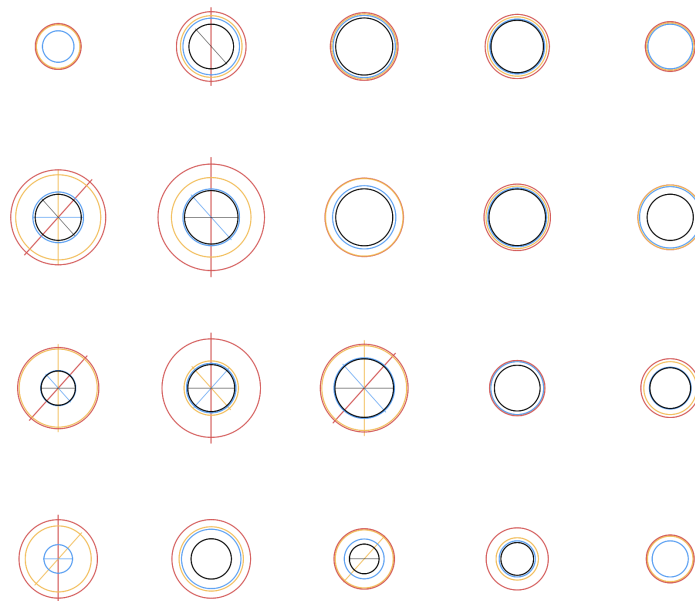
Vergleich der Bildschirmhälften

Auf einem horizontal geneigten Multitouch-Display sind Bewegungen, die auf der linken Bildschirmhälfte starten ($M = 8.87 \text{ bits/s}$, $SD = 2.13 \text{ bits/s}$) performanter als Bewegungen, deren Startpunkt auf der rechten Hälfte liegt ($M = 8.50 \text{ bits/s}$, $SD = 1.95 \text{ bits/s}$). Der Performanzunterschied ist statistisch signifikant mit $t(15) = 3.46$, $p < 0.01$, $Cohens d = 0.865$, bei zweiseitiger Testung. Derselbe Effekt konnte auch auf dem vertikalen Display nachgewiesen werden: links ($M = 7.61 \text{ bits/s}$, $SD = 1.46 \text{ bits/s}$) und rechts ($M = 7.38 \text{ bits/s}$, $SD = 1.48 \text{ bits/s}$) mit $t(15) = 2.71$, $p < 0.05$, $Cohens d = 0.678$.

Beim Vergleich der unteren und oberen Hälfte des Multitouch-Display zeigt sich ein Unterschied zwischen der horizontalen und vertikalen Neigung. Ein zweiseitiger abhängiger *t*-Test zeigt bei der horizontalen Neigung eine signifikant höhere Performanz zwischen Bewegungen mit einem Startpunkt in der unteren Hälfte ($M = 8.79 \text{ bits/s}$, $SD = 1.99 \text{ bits/s}$) gegenüber der oberen Hälfte ($M = 8.55 \text{ bits/s}$, $SD = 2.05 \text{ bits/s}$) mit $t(15) = 3.63$, $p < 0.002$, $Cohens d = 0.908$. Somit sind bei horizontal geneigtem Mutitouch-Display Bewegungen aus der unteren Hälfte performanter als Bewegungen aus der oberen Hälfte. Bei der vertikalen Neigung konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Hälften ausgemacht werden.



(a) Horizontal



(b) Vertikal

Abbildung 7.12.: Vergleich der Performanz für Bewegungsachsen. Alle Achsen mit signifikanten Unterschieden wurden eingezeichnet. Achsen ohne Signifikanzen wurden ausgelassen.

Vergleich Hauptfunktionsbereiche

Hauptbereich Um einen ersten Überblick über die Daten zu verschaffen, wurde zunächst explorativ eine MANOVA mit Messwiederholung für den Hauptarbeitsbereich im mittleren Display-Bereich gerechnet. Hierbei wurden fünf Faktoren berücksichtigt: Neigung mit zwei Ausprägungen, Start X mit drei Ausprägungen, Start Y mit zwei Ausprägungen, Distanz mit drei Ausprägungen sowie Winkel mit acht Ausprägungen. Dabei zeigten sich Haupteffekte für Start X, Distanz, Winkel und Neigung sowie eine Interaktion erster Ordnung zwischen Start X und Neigung sowie eine Interaktion zweiter Ordnung zwischen Start X, Distanz und Neigung.

Aufgrund der vorliegenden Interaktionen sind nicht alle Haupteffekte interpretierbar. Auf Basis dieser Ergebnisse ließ sich jedoch die Komplexität der Daten reduzieren, um sie inhaltlich interpretierbar zu machen. Dies erfolgte in verschiedenen Schritten:

1. Für Start Y konnte kein Haupteffekt gefunden werden. Auch ist dieser Faktor an keiner Interaktion beteiligt. Die Startposition auf der Y-Achse spielt demnach im mittleren Display-Bereich keine Rolle. Daher kann er fortan vernachlässigt werden.
2. Der Faktor Winkel zeigt einen Haupteffekt, ist jedoch an keiner Interaktion beteiligt. Damit ist dieser Faktor unabhängig von den anderen. Dies rechtfertigt eine gesonderte Betrachtung der Effekte für die Winkel anhand eines paarweisen Vergleichs der Mittelwerte. Daraus folgt, dass auch der Faktor Winkel in der nachfolgenden Berechnung nicht berücksichtigt werden muss.

Auf diese Weise konnten die ursprünglichen fünf Faktoren auf drei Faktoren reduziert werden. Diese sind Start X (3), Distanz (3) und Neigung (2). Eine $3 \times 3 \times 2$ MANOVA ergab die bereits beschriebenen Haupteffekte für die drei Faktoren sowie die Interaktion zwischen Start X und Neigung sowie Start X, Distanz und Neigung. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in der multiplen linearen Regressionsanalyse in Abschnitt 7.3.2 wider.

Ecken Für die horizontale Neigung können statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Ecken gemessen werden. Ein paarweiser *t*-Test mit einer Bonferroni-Holm-Korrektur zeigt, dass die linke untere Ecke die performanteste Ecke ist. Tabelle 7.1 zeigt die Werte der Einzelvergleiche. Beim vertikal geneigten Multitouch-Display können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ecken gefunden werden.

	Ecke 1		Ecke 2		<i>t</i> -Test		
	M	SD	M	SD	p-Wert	Cohens d	
LU	9.073	2.07	LO	8.11	2.07	< 0.004	1.062
LU	9.073	2.07	RU	8.21	2.05	< 0.01	0.925
LU	9.073	2.07	RO	8.15	2.03	< 0.05	0.718

Tabelle 7.1.: Vergleich der Performanz für Ecken. Ergebnis des paarweisen Vergleichs der Ecken beim horizontal geneigten Multitouch-Display. Links-Unten (LU), Links-Oben (LO), Rechts-Unten (RU) und Rechts-Oben (RO).

Randzonen Ein paarweiser *t*-Test mit einer Bonferroni-Holm Korrektur zeigt statistisch signifikante Unterschiede in den Randbereichen eines horizontal geneigten Multitouch-Display. Aus Tabelle 7.2 wird ersichtlich, dass die untere Randzone performantere Translationsbewegungen aufweist, als die obere und rechte Randzone. Die linke Randzone ist zudem performanter als die obere Randzone. Auf einem vertikal geneigtem Multitouch-Display konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

	Randzone 1			Randzone 2		t-Test	
	M	SD		M	SD	p-Wert	Cohens d
Unten	8.70	1.97	Oben	8.26	2.03	< 0.02	0.878
Unten	8.70	1.97	Rechts	8.40	1.88	< 0.03	0.780
Links	8.95	2.17	Oben	8.26	2.03	< 0.01	0.946

Tabelle 7.2.: Vergleich der Performanz für Randzonen. Ergebnis des paarweisen Vergleichs der Randzonen bei einem horizontal geneigten Multitouch-Display.

7.3.2. Anpassung von Fitts' Gesetz

Um die Faktoren *Neigung*, *Startpunkt* und *Bewegungsrichtung* in die Vorhersage einzubinden, wurde Fitts' Formel angepasst. Dazu wurde eine multiple lineare Regression mit diesen Faktoren durchgeführt. Da die realen Werte der Faktoren sehr groß sind und dies zu sehr kleinen Regressionskoeffizienten führen würde, wurden die realen Werte der Faktoren für die Berechnung der Regressionskoeffizienten indiziert. Dazu wurden die Werte 1 bis 5 für die 5 Startkoordinaten in X-Richtung verwendet (*StartX*). Die y-Koordinaten wurden durch die Zahlen 1 bis 4 ersetzt (*StartY*). Die acht Bewegungsrichtungen (*Winkel*) wurden dementsprechend durch die Zahlen 1 bis 8 dargestellt. Die Nummerierung erfolgte dabei im Uhrzeigersinn (1 = 0° ... 8 = 315°). Um die Neigung des Display zu kodieren, wurde 1 für die horizontale Neigung und 2 für die vertikale Neigung verwendet (*Neigung*).

Bevor die Regressionsanalyse durchgeführt wurde, wurden die Daten in einen Trainings- und einen Testsatz aufgeteilt. Dazu wurden Daten per Zufall ausgewählt, sodass in jedem Satz genau 50% der Daten aus der horizontalen und 50% aus der vertikalen Display Neigung enthalten waren. Die Regressionsanalyse wurde mit Hilfe des Trainingssatzes durchgeführt und führte zu folgendem Modell:

$$\begin{aligned}
 MT &= 0.0100 + 0.155 * ID \\
 &\quad + 0.008 * StartX \\
 &\quad + 0.053 * Neigung \\
 &\quad - 0.006 * Winkel \\
 \text{mit } R^2 &= 0.92
 \end{aligned}$$

Dieses Modell wird zukünftig als *angepasstes Fitts-Modell* bezeichnet. Die y-Koordinate war für dieses Modell nicht relevant ($p > 0.1$). Dies bestätigt auch die ANOVA für die Hauptzonen (siehe Abschnitt 7.3.1). Die erste Zeile entspricht Fitts' Gesetz.

Die Trainingsdaten wurden auch zur Berechnung der Koeffizienten in Fitts' Modell verwendet. Dies führte zu folgendem Modell, das zukünftig als *Fitts-Modell* bezeichnet wird:

$$y = 0.1605x + 0.089$$

Werden die Daten des Testsatzes (grün) mit den Vorhersagen nach *Fitts-Modell* (rot) und dem *angepassten Fitts-Modell* (blau) über die ID verglichen, so zeigt sich, dass beide Modelle relativ hohe Korrelationswerte aufweisen (*Fitts-Modell* $R^2 = 0.98$, *angepasste Fitts-Modell* $R^2=0.92$) (siehe Abbildung 7.13a).

Werden aber die anderen Faktoren Neigung, Startpunkt und Bewegungsrichtung mitberücksichtigt, so zeigt sich mit dem angepassten Modell ein differenziertes Bild der Performanz (siehe Abbildungen 7.13b, 7.13c, 7.13d). Das *angepasste Fitts-Modell* ist präziser als das Original *Fitts-Modell*. Bei festgelegter ID aber unterschiedlichen Faktoren zeigt *Fitts-Modell* immer eine konstante Zeit an, d. h. horizontale als auch vertikale Displayneigung sind gleich performant. Das *angepasste Fitts-Modell* berücksichtigt hingegen die unterschiedlichen Performanzen der Neigungen. In Abbildung 7.13b erkennt man die höhere Performanz des horizontal geneigten Display. Ebenso kann beobachtet werden, dass die linke Bildschirmhälfte performanter ist als die rechte (siehe Abbildung 7.13c). Abbildung 7.13d zeigt die unterschiedlichen Performanzen bei unterschiedlichen Bewegungsrichtungen.

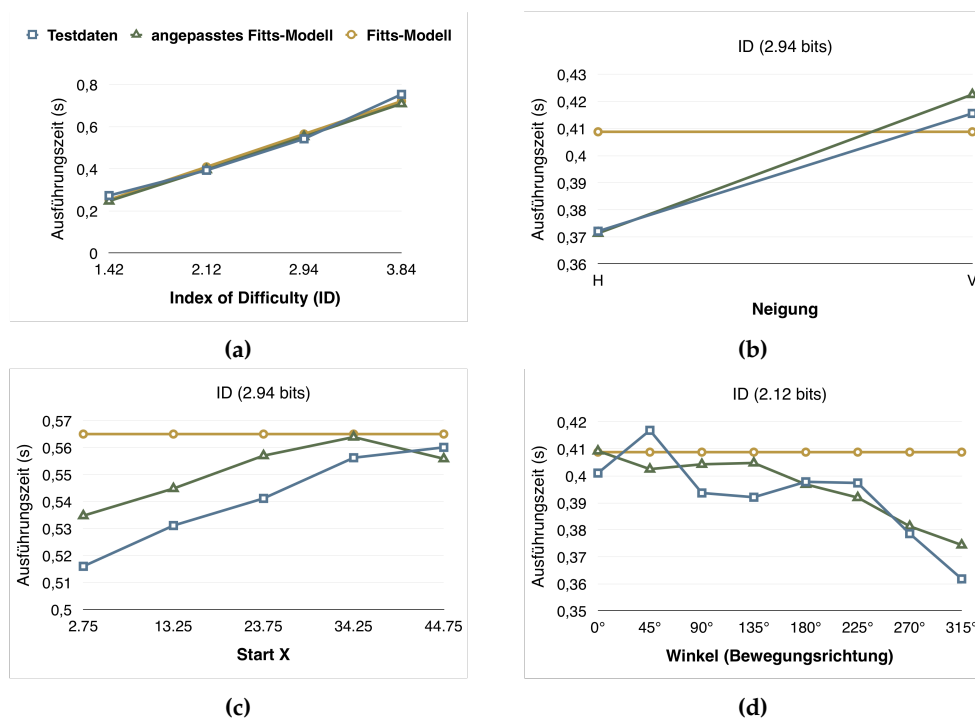


Abbildung 7.13.: Vergleich des angepassten mit dem ursprünglichen Fitts-Modell. *Fitts-Modell* ist gelb und das *angepasste Fitts-Modell* grün markiert. Die real gemessenen Testdaten sind blau. Vergleich für alle ID (a), für beide Neigungen (b), für die unterschiedlichen Startpunkte (c) und für die unterschiedlichen Winkel bzw. Bewegungsrichtungen (d).

7.3.3. Kinematische Ketten

Die Videoanalyse der Daten erfolgte post-hoc. Dazu wurde Anvil, ein freiverfügbares Video Annotationstool, in der Version 5.1.9. verwendet (Kipp, 2014). Zur Vereinfachung der Annotationen wurden die Logdateien vollautomatisch analysiert und die Bewegungszeitpunkte anhand der Zeitstempel (Timestamps) vorannotiert. Durch diese Vorannotationen mussten die Annotierer nur noch die kinematische Kette eintragen (Abbildung 7.14).

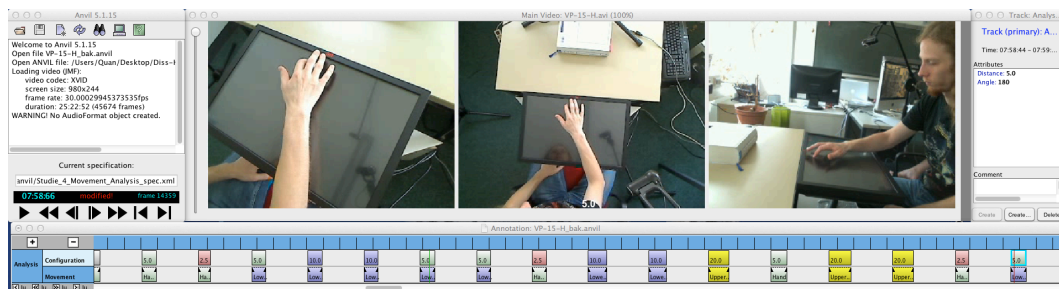


Abbildung 7.14.: Videoanalyse mit ANVIL. Die obere Reihe zeigt die Konfiguration der vorannotierten Elemente, die aus den Logdateien extrahiert wurden. Die untere Reihe zeigt die annotierten Elemente des Annotierers: rot = 2.5 cm (Finger), grün = 5 cm (Hand), blau = 10 cm (Unterarm), gelb = 20 cm (Oberarm).

Um eine subjektive Einschätzung zu relativieren, wurden alle Daten von zwei Annotierern getrennt und unabhängig voneinander annotiert. Dazu wurden die Labels umcodiert (Finger=0, Hand=1, Unterarm=2, Arm=3). Die Annotation der Videodateien zeigte bei der anschließenden Analyse eine relativ geringe Übereinstimmung beider Annotierer (*Cohens Kappa-Wert* 0.42). Es stellte sich jedoch heraus, dass das Briefing der Annotierer nicht ausreichend war. Aus diesem Grund war ein weiterer Durchgang notwendig und eine dritte Person wurde erneut mit der Annotation beauftragt. Dieses Mal wurden aber im Vorfeld die Kategorien und das Kodierschema anhand einer konkreten Videodatei deutlich erklärt. Anschließend wurden an einer Testdatei gemeinsam Annotationen durchgeführt. Dadurch konnte Cohens Kappa-Wert auf 0.86 deutlich verbessert werden.

Ein *Chi-Quadrat-Test* zeigte, dass die Displayneigung die Benutzung der kinematischen Kette beeinflusst, $\chi^2 = (3, n = 12335) = 423.210, p < 0.001$. Auf einem horizontal geneigten Multitouch-Display verwenden die Benutzer die kurzen kinematischen Ketten häufiger als auf einem vertikal geneigten Multitouch-Display. Tabelle 7.3 zeigt die Häufigkeit der verschiedenen kinematischen Ketten in Prozent an. Es ist zu sehen, dass die Werte für Finger, Hand und Unterarm für das horizontal geneigte Display im Vergleich zum vertikal geneigten Display um bis zu 200% steigen. Ein *t-Test* zeigt, dass die kürzeren Ketten (Finger, Hand und Unterarm) ($M = 9.36 \text{ bits/s}, SD = 2.27 \text{ bits/s}$) eine signifikant höhere Performanz aufweisen als die lange Kette (Oberarm) ($M = 8.47 \text{ bits/s}, SD = 1.95 \text{ bits/s}$) mit $t(15) = 6.593, p < 0.001$ (zweiseitiger Test). Dies gilt auch für das vertikal ausgerichtete Multitouch-Display: kurze Ketten ($M = 8.27 \text{ bits/s}, SD = 1.66 \text{ bits/s}$) und Oberarm ($M = 7.47 \text{ bits/s}, SD = 1.46 \text{ bits/s}$) mit $t(15) = 3.884, p < 0.001$ (zweiseitiger Test).

Distanz	Horizontal				Vertikal			
	Finger	Hand	Unterarm	Oberarm	Finger	Hand	Unterarm	Oberarm
2.5 cm	2.02 %	6.69 %	24.29 %	66.99 %	0.23 %	1.09 %	15.09 %	83.59 %
5 cm	0.06 %	1.14 %	23.26 %	75.54 %	0.00 %	0.11 %	10.69 %	89.20 %
10 cm	0.00 %	0.06 %	18.33 %	81.61 %	0.00 %	0.00 %	6.31 %	93.69 %
20 cm	0.00 %	0.00 %	8.54 %	91.46 %	0.00 %	0.00 %	0.33 %	99.67 %
insgesamt	0.52 %	1.97 %	18.61 %	78.90 %	0.06 %	0.30 %	8.10 %	91.54 %

Tabelle 7.3.: Prozentuale Verteilung der kinematischen Ketten auf die Distanzen.

7.3.4. Fragebogen und Interview

Die Auswertung des Fragebogens erfolgt über den Vergleich der Aussagen zwischen horizontaler und vertikaler Neigung. Im subjektiven Urteil der Versuchspersonen (Teil 1) zeigt sich eine eindeutige Präferenz für die horizontale Neigung über alle Beurteilungskategorien hinweg (70 % eindeutige Entscheidungen für das horizontale Multitouch-Display gegenüber lediglich 10 % für die vertikale Neigung, 20 % „weder noch“-Urteile).

Die Masse der Versuchspersonen empfindet die horizontale Neigung als müheloser, d. h. weniger aufwändig für die Aufgabenbearbeitung. Ebenso empfinden sie das Arbeiten damit als schneller (jeweils über 80 % der Befragten bei weiteren 12.5 % ohne eindeutige Präferenz). Auch wird sie als einfacher in der Handhabung im Sinne reiner Bedienbarkeit wahrgenommen (75 % bei 18.75 % ohne Präferenz) und ermöglicht schneller einen sicheren Umgang (62.5 % bei 25 % ohne Präferenz). Selbst in Bezug auf das Korrigieren von Fehlern, das beispielsweise beim Nachjustieren wegen Verfehlen des Ziels erforderlich war, wird die horizontale Neigung gegenüber der vertikalen bevorzugt (50 %, bei 31.25 % ohne Präferenz). Die Gesamtübersicht der prozentualen Verteilung der Präferenzen ist in Tabelle 7.4 aufgelistet.

	horizontal	weder noch	vertikal
Schneller sicheren Umgang	62.50 %	25.00 %	12.50 %
Einfachere Bedienbarkeit	75.00 %	18.75 %	6.25 %
Geringerer Aufwand bei Bedienung	81.25 %	12.50 %	6.25 %
Besser korrigierbar (genauerer Arbeiten)	50.00 %	31.25 %	18.75 %
Gefühlt schneller	81.25 %	12.50 %	6.25 %

Tabelle 7.4.: Vergleich des horizontal und vertikal geneigten Multitouch-Display im Urteil der Versuchspersonen (Fragebogen Teil 1).

Im zweiten Teil des Fragebogens bewerteten die Versuchspersonen fünf Aussagen zur horizontalen Neigung (Tisch-Stellung) und vertikalen Neigung. Für die Analyse wurden die Antworten in ein Intervall zwischen 1 („Stimme gar nicht zu.“) und 5 („Stimme voll und ganz zu.“) umgewandelt. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die jeweilige Neigung sind in Tabelle 7.5 zu sehen. Darin finden sich auch die Ergebnisse eines abhängigen zweiseitigen *t*-Tests. Dieser zeigt bis auf Frage 4 eine deutliche Präferenz für die horizontale Neigung. Die Versuchspersonen beurteilen die Arbeit am vertikal geneig-

ten Multitouch-Display als anstrengender bzw. ermüdender als die Arbeit am horizontal geneigten Multitouch-Display.

	horizontal		vertikal		t-Test			
	M	SD	M	SD	M	SD	t(15)	p-Wert
Frage 1 (Empfehlung)	4.50	0.63	2.50	0.97	2.00	1.27	6.33	<0.001
Frage 2 (Spaß)	4.25	0.86	2.69	0.87	1.56	1.15	5.42	<0.001
Frage 3 (Präferenz Orientierung)	4.25	0.78	2.13	0.89	2.13	1.50	5.67	<0.001
Frage 4 (Anstrengung)	2.00	0.82	3.88	1.03	-1.88	1.46	-5.16	<0.001
Frage 5 (Bevorzugung für Alltag)	3.94	0.93	2.00	0.89	1.94	1.65	4.69	<0.001

Tabelle 7.5.: Deskriptive und statistische Auswertung der fünf Fragen aus Fragebogen Teil 2. Mittelwerte (M) und Standardabweichung (SD) für beide Displayneigungen sowie die Ergebnisse eines entsprechenden t-Tests zum Vergleich der beiden Neigungen.

7.3.5. Beobachtungen der Versuchsleitung

Die protokollierten Beobachtungen der Versuchsleitung unterteilen sich in Körperhaltung, Arm-/Hand- und Fingerhaltung, Individuelle Faktoren sowie Fehlerquellen. Diese sind nachfolgend zusammengefasst.

Körperhaltung

In Bezug auf die Körperhaltung fiel auf, dass sowohl in der vertikalen, stärker jedoch in der horizontalen Neigung bei über der Hälfte der Versuchspersonen eine deutliche Neigung des Oberkörpers nach links zu erkennen war. Meist in Kombination mit einem Abstützen des linken, nicht arbeitenden Arms auf Tisch, Stuhllehne, Sitzfläche oder Oberschenkel.

Arm-/Hand- und Fingerhaltung

Insbesondere in Bezug auf die Armhaltung ließ sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Versuchspersonen feststellen: Entweder verblieb der Arm während der Untersuchung in einer Position *ständiger Bereitschaft* – d. h. er wurde dauerhaft nahe über oder vor dem Multitouch-Display gehalten ohne zwischen den Versuchen abgelegt zu werden. Oder der Arm wurde zwischenzeitlich zur Tischplatte (vertikal geneigtes Multitouch-Display), zum Display-Rand oder zum Körper zurückgeführt und dort abgelegt (horizontales Multitouch-Display). Die jeweils gewählte Variante beeinflusst deutlich die wahrgenommene Anstrengung. Diese wurde stärker beim Arbeiten in der vertikalen Neigung erkennbar. Dies zeigte sich durch häufige „Beschwerde“, Versuche die Schulter zu massieren, Nackenbewegungen zu Entspannung usw.

Das Arbeiten in der horizontalen Stellung machte ein Ablegen des Arms ohne den Arbeitsfluss zu unterbrechen eher schwierig und wurde deshalb nur von wenigen Versuchspersonen genutzt. Trotzdem waren dabei bedeutend weniger Anzeichen von Anstrengung erkennbar. In der anschließenden Befragung gaben die betroffenen Versuchspersonen an, dass sie bei der horizontalen Neigung nur in einer Ebene arbeiten müssten und dies daher

weniger anstrengend sei. Diese Präferenz spiegelt sich auch in der Wertung im Fragebogen wider.

Es konnten große Unterschiede bezüglich der Hand- und Fingerhaltung beobachtet werden. So gab es zum Beispiel verschiedene Varianten der Handöffnung: von fest oder sogar verkrampt geschlossen erscheinend bis leicht geschlossen über leicht geöffnet bis hin zu komplett geöffnet und stark abgespreizt. In den Pausen zwischen den Trials oder zwischen den Hauptteilen konnten besonders bei den verkrampt wirkenden Versuchspersonen Bewegungen und Übungen zur Lockerung der Hände beobachtet werden.

Individuelle Faktoren

Die Aufgabeninstruktion beinhaltete die Aufforderung „so schnell wie möglich“ zu arbeiten und dabei „so wenig Fehler wie möglich“ zu machen, d. h. gleichzeitig das Maximum an Geschwindigkeit sowie Genauigkeit zu erreichen. Das Aufgabenverständnis bzw. die Gewichtung dieser beiden Komponenten scheint abhängig von der individuellen Persönlichkeit zu sein und beeinflusst die angewandte Strategie der Versuchspersonen. Dies führte zu unterschiedlichen Bearbeitungsstilen. Die Versuchsleitung definierte drei unterscheidbare Strategien und ordnete die Versuchspersonen auf Basis der Verhaltensbeobachtung subjektiv zu:

1. Schnelles Arbeiten zu Lasten der Genauigkeit: 18,75 %
2. Genaues Arbeiten zu Lasten der Geschwindigkeit: 43,75 %
3. Maximale Geschwindigkeit bei maximaler Genauigkeit (instruktionsgemäß): 37,5 %

Fehlerquellen

Es lassen sich verschiedene Quellen für Fehler voneinander unterscheiden:

Systembedingte Fehler: Sie entstehen ohne Zutun der Versuchsperson, wenn z. B. die Multitouch-Oberfläche nicht auf Berührung reagiert oder es zu einem unerklärlichen Kontaktverlust kommt. Aufgrund der Beobachtungen kann aber von einem Zusammenhang zwischen dieser Art von Fehler und der hohen Hitzeentwicklung des eingesetzten Display ausgegangen werden.

Benutzungsbedingte Fehler: Sie resultieren aus der Art, wie eine Versuchspersonen das Multitouch-Display benutzt (ungünstige Bewegungsausführung), wie z. B. bei einer ungünstigen Fingerauflage oder Handhaltung.

Persönlichkeitsbedingte Fehler: Sie entstehen durch die von der Versuchsperson individuell gewählten Bearbeitungsstrategie. z. B. provoziert Ehrgeiz in Bezug auf Geschwindigkeit eine Ungenauigkeit durch überschießende Bewegungen.

Individuell bedingte Fehler: Diese beziehen sich darauf, dass individuelle physiologische Eigenschaften zu Benutzungsproblemen führen. Beispielsweise entsteht bei sehr tro-

ckenen oder feuchten Händen eine hohe Reibung (Cockburn et al., 2012). Dies führt zu Sprüngen oder ein „Stottern“ in der Bewegung des Fingers und somit auch zu Kontaktverlust zum Multitouch-Display. Viele Versuchspersonen berichteten, dass ihnen diese Bewegung besonders schwer fallen oder sie unangenehm sind. Als Grund benennen sie meist eine höhere Reibung bzw. einen größeren „Widerstand zwischen Haut und Bildschirm“. Das Problem tritt zwar in beiden Neigungen auf, wird aber im Fragebogen häufiger explizit für das vertikale Multitouch-Display benannt. Der Widerstand wird als unangenehm empfunden, wenn der Finger senkrecht nach oben bewegt wird, da eine Spannung zwischen Haut und Fingernagel entsteht. Daher wurden zum Teil Strategien entwickelt, um dem Widerstand entgegenzuwirken. So wurde beispielsweise die Hand bzw. der Arm zur Seite gedreht, um sie dann seitlich nach oben zu bewegen. Zusätzlich kam es bei längeren Fingernägeln besonders bei Aufwärtsbewegungen auf dem vertikal geneigten Display häufig zum Kontaktverlust. Dies geschah insbesondere dann, wenn der Winkel zwischen Finger und Oberfläche zu groß wurde. Auch wenn die Versuchspersonen ihre Bewegungen daraufhin anpassten, konnten sie insbesondere bei den schnelleren Bewegungen nicht endgültig vermieden werden.

7.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend können aus der Studie folgende Erkenntnisse gewonnen werden: Hinsichtlich der Performanz sind verschiedene Aussagen möglich. Das horizontal geneigte Multitouch-Display zeigt eine signifikant höhere Performanz als das vertikal geneigte Display. Für beide Displayneigungen zeigt sich eine signifikant höhere Performanz bei Bewegungen, die aus der linken Displayhälfte starten als bei Bewegungen, die aus der rechten Displayhälfte starten. Beim vertikal geneigten Display zeigen sich keine weiteren Unterschiede. Beim horizontal geneigten Multitouch-Display können hingegen differenzierte Unterschiede festgestellt werden: Bewegungen aus der unteren Hälfte sind signifikant performanter als Bewegungen aus der oberen Hälfte. Bewegungen aus der linken unteren Ecke weisen die höchste, die aus der Ecke links oben die niedrigste Performanz auf. Unter den Randzonen ist der untere und linke Rand am performantesten, der obere Rand ist am wenigsten performant. Aufwärtsbewegungen aus der unteren Hälfte sind performanter als Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte. Es bestehen für beide Displayneigungen zum Teil hochsignifikante Performanzunterschiede zwischen den einzelnen Achsen. Diese sind jedoch stark heterogen und lassen sich nicht bislang nicht sinnvoll kategorisieren. Die Ergebnisse zu den kinematischen Ketten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Auf einem horizontal geneigten Multitouch-Display werden häufiger kurze kinematische Ketten verwendet als bei einem vertikal geneigten Display. Kurze kinematische Ketten weisen eine signifikant höhere Performanz auf als lange Ketten. Die Auswertung der Fragebögen zeigt, dass die Versuchspersonen die Nutzung des horizontal geneigten Multitouch-Display insgesamt bevorzugen. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die empfundene Anstrengung, denn das Arbeiten am vertikal geneigten Display wird als sehr viel anstrengender empfunden als die Arbeit in der horizontalen Neigung. Das angepasste Fitts Modell bildet die Verläufe der real gemessenen Zeiten besser und differenzierter ab als das ursprüngliche Fitts Modell.

7.4. Diskussion

Die Ergebnisse zu den Hypothesen, die für dieses Kapitel formuliert wurden, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Der Vergleich von vertikaler und horizontaler Neigung *bestätigt Hypothese H1*, die besagt, dass die Performanz bei einem horizontal geneigten Multitouch-Display höher ist als bei einem vertikal geneigten Display. *Hypothese H2* muss *verworfen* werden, da der Vergleich aller Rechts- gegen alle Linksbewegungen unabhängig von der Display-Orientierung keinen signifikanten Unterschied zeigt. Somit kann nicht bestätigt werden, dass Rechtsbewegungen performanter als Linksbewegungen sind. *Hypothese H3* postuliert, dass Aufwärtsbewegungen aus der unteren Hälfte bei horizontaler Neigung performanter sind als Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte. Der Vergleich der oberen und unteren Display-Hälfte *bestätigt* dies. *Hypothese H4* vermutete demgegenüber bei einem vertikal geneigten Multitouch-Display, dass Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte performanter als Aufwärtsbewegungen aus der unteren Hälfte sein müssten. Es konnte jedoch kein entsprechender Unterschied festgestellt werden. Die Hypothese wird somit *verworfen*. Der Vergleich aller Bewegungen der beiden Display-Hälften unabhängig von der Bewegungsrichtung *bestätigt Hypothese H5*: Bewegungen aus der linken Hälfte sind performanter als Bewegungen aus der rechten Hälfte. Die Analyse des Throughput zeigt, dass kurze kinematische Ketten performanter sind als lange kinematische Ketten, was in *Hypothese H6* formuliert wurde. Sie gilt somit als *bestätigt*. *Hypothese H7* besagt, dass das Arbeiten am vertikal geneigten Multitouch-Display anstrengender bzw. ermüdender ist als am horizontal geneigten Multitouch-Display. Dies wird durch die subjektiven Angaben der Versuchspersonen und die Beobachtungen der Versuchsleitung *bestätigt*. *Hypothese H8* kann ebenfalls *bestätigt* werden. Denn die Versuchspersonen geben an, dass kurze kinematische Ketten weniger ermüdend sind als lange kinematische Ketten.

Diese Erkenntnisse lassen sich folgendermaßen in den bisherigen Forschungskontext integrieren:

Performanz

Die Ergebnisse zeigen in erster Linie, dass die Performanz von Translationsbewegungen von der Neigung des Display, dem Startpunkt der Interaktion und der Bewegungsrichtung abhängig ist. Die horizontale Displayneigung erzielt im Vergleich zur vertikalen Neigung die beste Performanz. Damit kann *Hypothese H1* bestätigt werden: *Ein horizontal geneigtes Multitouch-Display ist performanter als ein vertikal geneigtes Multitouch-Display*. Dieses Ergebnis bestätigt frühere Ergebnisse von Bi et al. (2011) oder Pedersen und Hornbæk (2012). Während Erstere dies für einen normalen Multitouch-Monitor feststellten, zeigten Letztere dies für große Displays. Weiss et al. (2010) konnten in ihren Untersuchungen am *BendDesk* allerdings keinen Unterschied in der Performanz zwischen diesen beiden Neigungen feststellen. Dies könnte auf die andere Displaygröße und die Beschränkungen zurückzuführen sein, da sie nur sieben Zonen untersuchten und sich nur auf Auf- und Abwärtsbewegungen beschränkten. Weitere Untersuchungen könnten unterschiedliche Displaygrößen mit einer

höheren Anzahl von Bewegungsrichtungen und Zonen vergleichen, um zu differenzieren, inwiefern sich die Ergebnisse unter anderen Bedingungen replizieren lassen. Grundsätzlich kann früheren Empfehlungen zum Einsatz des Multitouch-Display in horizontaler Neigung aus Sicht der Performanz entsprochen werden (Bi et al., 2011; Rogers und Lindley, 2004; Watson et al., 2013).

Die Hypothesen bezüglich der Bereiche und Bewegungsrichtungen können nicht umfassend bestätigt werden. *Hypothese H3 – Aufwärtsbewegungen sind bei horizontaler Neigung aus der unteren Hälfte performanter als Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte* – hat sich bestätigt. Dies gilt jedoch auch für das vertikal geneigte Display, für das *Hypothese H4* das Gegenteil aufgrund der Reibung des Fingers (Cockburn et al., 2012) angenommen hatte (*Bei einem vertikal geneigten Multitouch-Display sind Abwärtsbewegungen aus der oberen Hälfte performanter als Aufwärtsbewegungen aus der unteren Hälfte*). Das Problem der erhöhten Reibung wird ebenfalls innerhalb der hier durchgeführten Studie durch die Versuchsleitung beobachtet. Auch geben die Versuchspersonen dieses Problem für beide Neigungen an, wobei es im Fragebogen häufiger explizit für das vertikale Multitouch-Display benannt wird. Jedoch bestätigt sich die subjektive Einschätzung von Versuchsleitung und Versuchspersonen nicht in den objektiven Ausführungszeiten. Demnach scheint die Reibung der Finger keine so große Rolle für die Performanz zu spielen, wie Cockburn et al. es vermuteten. Sie bleibt jedoch eine Herausforderung, die gelöst werden muss – insbesondere mit Blick auf die User Experience. Eine andere Erklärung für die höhere Performanz könnten die Ergebnisse von Weiss et al. (2010) liefern. Sie fanden zwar keine Signifikanzen für Auf- und Abwärtsbewegungen, berichteten aber für das horizontal geneigte Display von kürzeren Pfaden bei Aufwärtsbewegungen im Vergleich zu Abwärtsbewegungen. Demnach scheint der direkte Weg für die Versuchspersonen darauf leichter zu sein.

Die höhere Performanz von Aufwärtsbewegungen aus der unteren Hälfte bei horizontaler (Bestätigung von *Hypothese H3*) und vertikaler Neigung (Ablehnung von *Hypothese H4*) könnte als Bestätigung der Beobachtung von Zhao et al. (2015) angesehen werden. Denn sie stellten fest, dass Bewegungen aus Bereichen, die näher am Benutzer sind, effizienter sind als weiter entfernt liegende Bereiche. Dies lässt sich auf die Display-Bereiche übertragen: Die untere Hälfte liegt näher am Benutzer und könnte daher performanter sein, wobei die obere Hälfte des Multitouch-Display weiter entfernt ist und demnach an Performanz verliert. *Hypothese H2* besagt, Rechtsbewegungen sind performanter als Linksbewegungen. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Sowohl die Ergebnisse aus Kapitel 6 als auch die von Zhao et al. (2015) deuten jedoch darauf hin, dass Bewegungen nach rechts schneller sind als Bewegungen nach links. Olafsdottir et al. (2014) konnten beispielsweise einen vergleichbaren Effekt zeigen, da sie für linksgerichtete Interaktionen eine höhere Schwierigkeit feststellen konnten. Allerdings war in all diesen Fällen die reine Translation nicht Gegenstand der Untersuchung. Es wurden entweder kombinierte Translations-Rotations-Interaktionen bzw. Rotations-Translations-Skalierungs-Interaktionen oder Translationen mit zwei Fingern wie Daumen und Zeigefinger untersucht. Dies deutet daraufhin, dass der Performanzunterschied in Bezug auf die Bewegungsrichtung entweder der Rotation oder dem Einsatz von zwei Fingern geschuldet sein könnte. Dies könnte auch die Ergebnisse aus Kapitel *Vergleich von Translation und Rotation* bestätigen. Interaktionstechniken, die Rotation beinhalten, sind schwieriger als die Standardinteraktionstechniken für Translation und Skalierung. Der Un-

terschied von Translationen mit einem zu solchen mit zwei Fingern könnte die Arbeit von Lozano et al. (2011) erklären. Die Autoren konnten zeigen, dass Interaktionstechniken, die zwei Finger involvieren zu einer erhöhten Belastung der Muskeln führen. Demnach könnte die erhöhte Schwierigkeit allein auf die Integration von zwei Fingern zurückzuführen sein und somit eine unterschiedliche Performanz für Links- und Rechtsbewegungen verursachen. Die Translation mit einem Finger ist demnach als einfacher anzusehen, unabhängig davon, ob zusätzlich eine Rotation involviert ist oder nicht.

Zwar sind Rechtsbewegungen nicht wie erwartet performanter als Linksbewegungen (*Hypothese H2*), jedoch kann bestätigt werden, dass *Bewegungen aus der linken Hälfte performanter sind als Bewegungen aus der rechten Hälfte (Hypothese H5)*. Damit können die Erkenntnisse von Hoggan et al. (2013a) und Hoggan et al. (2013b) zu ipsi- und kontralateralen Rotationen mit Aussagen zur Translation ergänzt werden. Deren Arbeiten zur *Pinch*-Geste und der *2-Punkt-RT*-Technik liefern ein zu dieser Arbeit entgegengesetztes Bild. *Pinch*-Gesten sind auf der kontralateralen Seite (auf der entgegengesetzten Körperhälfte in Bezug zur dominanten Hand; hier links) am langsamsten und produzieren die meisten Fehler (Hoggan et al., 2013a). Gesten auf der ipsilateralen Seite (hier rechts) sind hingegen am schnellsten. Auch bei der *2-Punkt-RT*-Technik zeigte sich auf der kontralateralen Seite, dass Rotationen gegen den Uhrzeigersinn mehr Fehler erzeugen und zudem langsamer als Rotationen im Uhrzeigersinn sind (Hoggan et al., 2013b). Auf der ipsilateralen Seite spiegelte sich dieses Bild, sodass dort Rotationen im Uhrzeigersinn die langsamsten und fehleranfälligsten waren. Überträgt man das Lateralitätskonzept auf die vorliegenden Ergebnisse, ergibt sich im Gegensatz zu den Rotationen: Translationen mit Ursprung auf der kontralateralen Seite sind performanter als Translationen mit Ursprung auf der ipsilateralen Seite.

Zusammenfassend können die Ergebnisse der Performanzanalysen ein Optimierungspotenzial für derzeitige Designentscheidungen von Betriebssystemen aufdecken, sofern diese für Multitouch optimiert werden sollen. So sollte beispielsweise die Entscheidung, Menüelemente wie beispielsweise die Windows 8 Charm Bar am rechten Rand zu positionieren, noch einmal überdacht werden. Stattdessen könnte diese nach auf die performantere linke Seite verlegt werden (siehe Abbildung 7.15b). Dies gilt auch für Menüleisten, die zum Verschieben der Fenster benötigt werden. Diese wären aufgrund der besseren Performanz der Aufwärtsbewegung im unteren Fensterbereich besser platziert (siehe Abbildung 7.15d). Allerdings gelten diese Empfehlungen nur für horizontal geneigte Displays. Vertikal geneigte Displays weisen weniger Unterschiede und somit ein homogeneres Bild in Bezug auf die Performanz auf. Horizontale Displays haben somit ein höheres Potenzial für eine performante Nutzung und bieten mehr Möglichkeiten der bereichsbezogenen Design-Optimierung. Dies bestätigt die Empfehlung verschiedener Arbeiten (u.a. Bi et al., 2011), dass zukünftige Arbeitsplätze, an denen Multitouch eingesetzt werden soll, auf vertikale Displays verzichten. Die Frage, ob solche Anpassungen der Benutzeroberfläche zugunsten einer besseren Performanz Vorrang vor dem Design der Benutzeroberfläche gegeben werden sollte, ist in der Literatur noch nicht vollständig geklärt (Frøkjær et al., 2000). Zum einen zeigte sich, dass Benutzer ein schönes Design als effizienter und positiver empfinden (Quinn und Tran, 2010). Zum anderen konnte auch beobachtet werden, dass der „Wow-Effekt“ bei schönen Benutzeroberflächen schnell vergeht und dass dann Produktivität und somit Performanz in den Vordergrund rücken. Anfänglich wurde das Multitouch auch in dieser Studie (siehe Kapitel 4) als sehr

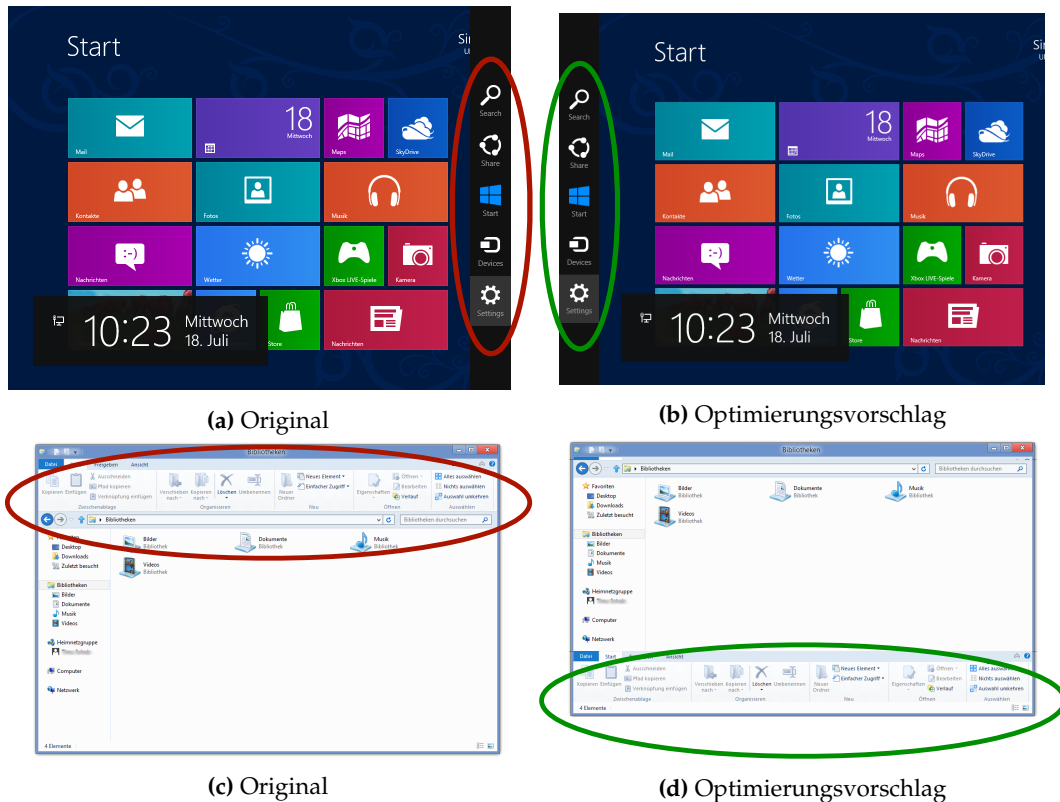


Abbildung 7.15: Optimierungsvorschläge aktueller Benutzeroberflächen. Die rot markierten Elemente zeigen die ursprüngliche Designentscheidung. Die grünen Markierungen heben die auf den Ergebnissen basierenden Optimierungsvorschläge hervor.

positiv beurteilt, aber bereits nach wenigen Sitzungen ist an den Äußerungen der Versuchspersonen zu erkennen, dass die schnelle Aufgabenerledigung mit der Multitouch-Steuerung gegenüber dem „coolness“-Faktor an Bedeutung gewinnt. Dies bestätigt frühere Arbeiten, bei denen ein effizientes Interface-Design über die Zeit immer an Bedeutung gewinnt. Nielsen und Levy (1994) stellten in ihrer Metaanalyse über 57 Studien fest, dass Systeme mit besserer Performanz und Effizienz häufiger von Benutzern präferiert werden. Ebenso konnten Tuch et al. (2012) zeigen, dass ein ineffizientes Design einer Webseite nach der Nutzung als „hässlicher“ bewertet wurde, während die Bewertung bei dem effizienteren Design gleich blieb. Andere Studien sprechen jedoch für die These, dass das Design und der *joy of use* entscheidender sind, da solche Systeme zu einem effizienteren und kreativeren Arbeiten motivieren bzw. das Arbeiten von den Nutzern als effizienter wahrgenommen wird (Norman, 2004; Tractinsky et al., 2000).

Ben-Bassat et al. (2006) weisen jedoch darauf hin, dass ein positives Urteil der Nutzer hinsichtlich der Ästhetik eines Interface nicht zwangweise bedeutet, dass die Nutzer damit effizienter sind und es unter allen Umständen präferieren. Die Autoren untersuchten deshalb in ihrer Studie, wie die Beurteilung und Akzeptanz eines Interface ausfällt, wenn die Nutzer einen echten monetären Verlust aufgrund einer schlechten Performanz zu befürchten haben. Die Studie zeigte, dass die Nutzer sich für das effizientere Interface entschieden, auch

wenn sie es als „hässlich“ beurteilten. Damit zeigen Ben-Bassat et al., dass in produktiven Systemen die Performanz der Benutzeroberfläche einen höheren Stellenwert als deren Ästhetik hat. Sie schlagen deshalb vor, die Präferenz eines Benutzer-Interface mit objektiveren Methoden zu bewerten. Die Ergebnisse anderer Arbeiten stützen die Erkenntnisse von Ben-Bassat et al. Nielsen und Levy (1994) zeigten, dass die Benutzer in 75 % der Studien das schnellere System präferieren. Sie berichteten auch, dass das Design einer Oberfläche schlechter beurteilt wird, wenn die Benutzung weniger effizient ist. Das gleiche gilt für eine weniger effektive Benutzung (Tuch et al., 2012). Sonderegger et al. (2014) berichteten, dass die Nutzung eines Gerätes mit einem *schöneren* Design nicht zwangsläufig zu einer höheren Performanz führt. In ihrer Studie beobachteten sie einen umgekehrten Effekt: Die Performanz des *schöneren* Designs sank, obwohl die Nutzer diesem Interface eine höhere Usability zusprachen. All dies spricht dafür, Interfaces nicht nur nach ästhetischen Aspekten zu entwerfen, sondern auch Aspekte der Performanz und Effizienz zu berücksichtigen. Diese Faktoren sind insbesondere bei lebenskritischen Applikationen wie der medizinischen Versorgung, in Nuklearreaktoren, bei Luftüberwachung, bei Feuerwehr- und Polizeianwendungen sowie für Raumfahrt- oder Militär-Kommandos wichtig. Auch bei zeitkritischen und sich ständig wiederholenden Aktionen wie Banken- oder Tradingsoftware spielen Performanz und Effizienz eine zentrale Rolle (Shneiderman, 1982). Die unterschiedlichen Forschungsergebnisse legen jedoch trotzdem nahe, dass weitere Untersuchungen diesbezüglich notwendig sind. Weitere Arbeiten könnten untersuchen, ob Optimierungen auf Basis von Performanzuntersuchungen eine tatsächliche Steigerung der Performanz bewirken und so zu einem besseren Nutzungserlebnis führen.

Fitts' Gesetz

Die Ergebnisse der Performanzanalysen zeigen, dass die Originalbeschreibung von Fitts' Gesetz nicht ausreichend ist, um Ausführungszeiten auf Multitouch adäquat vorherzusagen. Weitere Faktoren müssen bei der Analyse der Performanz und Effizienz berücksichtigt werden, um Interaktionstechniken und Eingabegeräte optimal miteinander vergleichen zu können. Für die Faktoren Startpunkt und Richtung der Bewegung sowie Neigung des Multitouch-Display konnte gezeigt werden, dass sie die Performanz von Translation per Dragging auf Multitouch beeinflussen. Dies konnte mit einem exemplarisch angepassten Fitts-Modell gezeigt werden. Dieses und ähnlich angepasste Modelle könnten es ermöglichen, Analysen und Auswertungen von Interaktionstechniken und Interface-Designs teilautomatisiert durchzuführen, da die Performanz oder Effizienz genauer vorhergesagt werden können. Abbildung 7.16 illustriert ein solches Anwendungsfeld: Der Interface-Designer schlägt die Platzierung eines Objekts vor (Abbildung 7.16a), das System bewertet diese Platzierung unter Berücksichtigung von Faktoren wie zum Beispiel der erforderlichen Bewegungsrichtungen (0° – 325°) und schlägt gegebenenfalls Alternativen vor (Abbildung 7.16b).

Innerhalb der vorliegenden Studie wurde nur eine Displaygröße untersucht. Zukünftige Arbeiten sollten sich hinsichtlich der Performanz auch mit kleineren und größeren Formfaktoren beschäftigen. Kleinere Geräte wie Smartphones oder Tablets werden oft nur mit dem Daumen verwendet. Auch kommt es hier zur Verwendung in verschiedenen Positionen

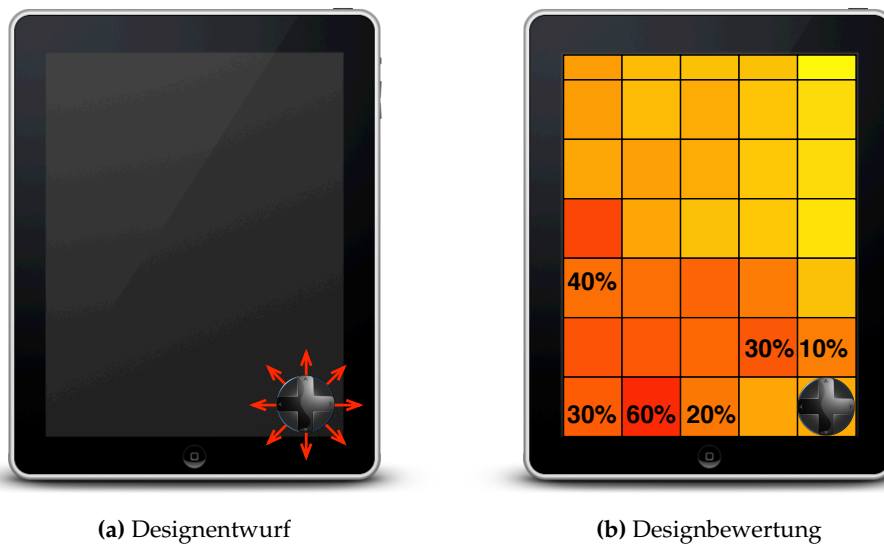


Abbildung 7.16.: Beispiel für eine automatisierte Designbewertung. Ein virtueller Joystick soll am unteren rechten Rand platziert werden (a). Eine automatische Bewertung des Entwurfs zeigt die prozentualen Performanzunterschiede. Eine Verschiebung des Joystick nach links könnte eine Steigerung der Performanz von bis zu 60 % bedeuten (b).

(sitzend, stehend, liegend) und in verschiedenen Neigungen (45° oder ganz individuell bei mobilen Geräten). Bei größeren Geräten wie Smartboards oder Multitouch-Wänden müssen die Benutzer unter Umständen mit Reichweiteproblemen kämpfen, sodass sie sich zum Erreichen bestimmter Bereiche strecken oder bewegen müssen.

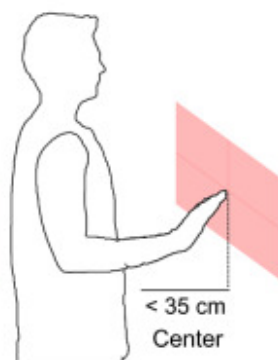
Diese Arbeit belegt erstmals, dass ein angepasstes Fitts Modell zu genaueren Vorhersagen gegenüber der Originalformulierung von Fitts führt. Dies müssen zukünftige Arbeiten berücksichtigen, die die Performanz unterschiedlicher Interaktionstechniken oder Eingabegeräte untersuchen bzw. miteinander vergleichen wollen. Dies könnte die Forschung rund um Fitts' Gesetz in neue Richtungen lenken. Des Weiteren sollen diese Ergebnisse zukünftige Arbeiten dazu motivieren, weitere Einflussfaktoren zu identifizieren und zu versuchen, ein allgemeines Modell basierend auf den wichtigsten Faktoren zu definieren.

Kinematische Ketten

Die Analyse der Bewegungen zeigt, dass die Nutzer beim horizontalen Display häufiger kurze kinematische Ketten – d.h. solche ohne eine Beteiligung des Oberarms – einsetzen. Die Angaben der Versuchspersonen bestätigen, dass kürzere kinematische Ketten subjektiv am wenigsten Ermüdung verursachen. In der vertikalen Neigung zeigt sich hingegen eine höhere Anstrengung und Ermüdung, was an häufigen „Beschwerden“ sowie an Versuchen, die Schulter zu massieren und den Nacken durch Bewegungen zu entspannen, zu erkennen war. Diese Beobachtungen können als deutliche Hinweise auf das *Gorilla-Arm-Syndrom* interpretiert werden (Hincapié-Ramos et al., 2014; Loi, 2013). Dies spricht für die *Hypothese H7: Das Arbeiten am vertikal geneigten Multitouch-Display ist anstrengender bzw. ermüdender als am horizontal geneigten Multitouch-Display.*

Können jedoch die kurzen kinematischen Ketten und die geringere Ermüdung auch objektiv in einen Zusammenhang gebracht werden? Zum einen zeigen die Analysen, dass die kinematischen Ketten die Performanz beeinflussen: Für kürzere Ketten (ohne Beteiligung des Oberarms) wurde eine höhere Performanz als für lange Ketten (mit Beteiligung des Oberarms) beobachtet. Dies bestätigt *Hypothese H6*, in der angenommen wurde, dass *kurze kinematische Ketten performanter als lange kinematische Ketten sind*. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen (Balakrishnan und MacKenzie, 1997; Langolf et al., 1976). Zum anderen kann die Studie von Hincapié-Ramos et al. (2014) als Beleg für einen Zusammenhang von Ermüdung und Länge einer kinematischen Kette angesehen werden. Die Autoren zeigten, dass ein angewinkelter Arm (*Bent-arm Position*) beim Arbeiten in Hüfthöhe die ermüdungsärmste Haltung ist. Diese Haltung entspricht dem Konzept einer kurzen kinematischen Kette (siehe Abbildung 7.17). Daher lässt sich schließen, dass die kinematischen Ketten nicht nur mit der Performanz sondern auch mit der Ermüdung korrelieren: *Kurze kinematische Ketten sind weniger ermüdend als lange kinematische Ketten (Hypothese H8)*.

Zusammenfassend implizieren die Ergebnisse zu den kinematischen Ketten, dass es sinnvoll ist, Nutzer in die Benutzung von Multitouch-Displays einzuweisen, um sicherzustellen, dass kürzere kinematische Ketten verwendet werden. Denn deren Verwendung beinhaltet eine Reduzierung der Ermüdung sowie eine bessere Performanz. Langfristig sind beide Aspekte relevant, um das Multitouch als Eingabegerät verstärkt nutzbar zu machen.



(a) Bent-arm



(b) Kurze kinematische Kette

Abbildung 7.17.: *Bent arm position* entspricht der kurzen kinematischen Kette.

In Bezug auf das Vorgehen bei der Analyse der kinematischen Ketten ist folgendes anzumerken: Die Entscheidung, die Untersuchung der kinematischen Ketten post-hoc über Videoanalysen durchzuführen, gab den Versuchspersonen die Möglichkeit, sich frei und natürlich zu bewegen. Der Nachteil der Videoanalysen liegt jedoch in einer stark subjektiven Bewertung. Wie Abschnitt 7.3.3 zeigt, ist ein möglichst genaues und umfassendes Briefing der Annotierer entscheidend für die Qualität der Analysen. Nachfolgende Arbeiten sollten daher exakte Messinstrumente zur Bestimmung verwenden. Sensoren, die die Muskelaktivitäten exakt protokollieren, oder Motion-Capture-Systeme, die alle Bewegungen registrieren, könnten eine objektive Bewertung des Einsatzes kinematischer Ketten ermöglichen.

Zukünftige Arbeiten könnten zudem die Korrelation zwischen Performanz, wahrgenommener Ermüdung und Verwendung kürzerer kinematischer Ketten untersuchen. Indem die Versuchspersonen zusätzlich zur intuitiven Nutzung auf die Nutzung von kürzeren kinematischen Ketten trainiert werden, könnten die Werte für Performanz und Ermüdung miteinander verglichen werden. Damit könnte überprüft werden, inwiefern der Einsatz kürzerer kinematischer Ketten bei Multitouch-Interaktionen das *Gorilla-Arm-Syndrom* minimieren oder ihm vorbeugen kann.

Fehler

Wie in Abschnitt 7.3.5 beschrieben, konnten oft „Berührungs- bzw. Kontaktprobleme“ beobachtet werden. Diese traten oft im rechten unteren Bereich des vertikal geneigten Multitouch-Display auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass eine optimale Auflage des Fingers in diesem Bereich schwieriger ist. Die Auflagefläche des Fingers wird bei einem vertikalen Display wesentlich stärker von der Neigung des Handgelenks beeinflusst als bei einer horizontalen Ausrichtung des Display. Dadurch erfordert das Arbeiten im Sitzen vor dem vertikalen Display eine stärkere Anpassung der Orientierung des Handgelenks, um eine Auflage des Fingers überhaupt zu ermöglichen. Solche Anpassungsversuche zeigten sich in einem starken Kippen und einem Ausweichen des Arms, um die Hand seitlich zu drehen (siehe Abbildung 7.18). Diese Beobachtungen widerlegen die Annahme von Forlines et al. (2007), die gleichbleibende Kontaktflächen der Finger bei kleinen Displays in vertikaler Stellung vermuten. Weitere Studien sollten sich diesem Aspekten widmen.

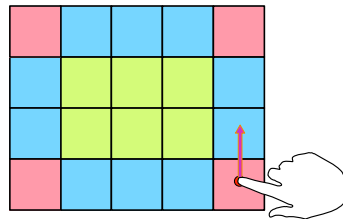


Abbildung 7.18.: Ausweichverhalten bzw. Anpassung der Handorientierung, damit die Auflage des Fingers im unteren rechten Display-Bereich möglich wird.

Auf Augenhöhe im oberen Display-Bereich und in der linken Displayhälfte scheinen gute Voraussetzungen für ein angenehmes Arbeiten zu bestehen. Denn in der oberen Hälfte relativiert das Heben des Arms die Neigung des Handgelenks, wodurch die Hand nahezu parallel zum Display geführt werden kann (siehe Abbildung 7.19a). Im linken unteren Bereich verhält es sich ähnlich: Durch das Übergreifen mit der rechten Hand über die Körpermittellinie auf die linke Seite müssen sowohl die anatomische Barriere des eigenen Körpers als auch eine größere Distanz überwunden werden. Dadurch relativiert sich auch hier der Winkel zwischen Finger und Gerät. Zusätzlich dreht sich das Handgelenk automatisch und schafft so bessere Voraussetzungen für eine gute Fingerauflage (siehe Abbildung 7.19b).

Beobachtungen der Versuchsleitung

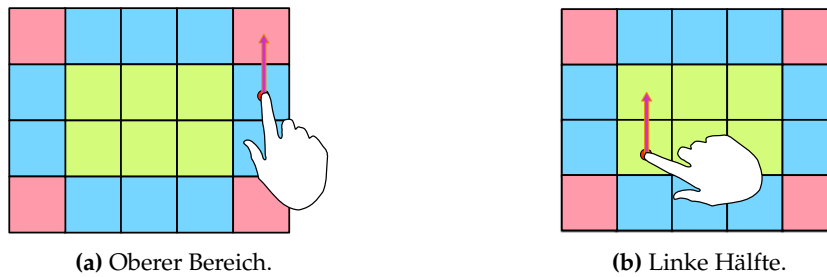


Abbildung 7.19.: Unterschiedliche Handorientierung bei der Arbeit mit einem Multitouch-Display. Je nach Display-Bereich ergeben sich Vorteile für die Fingerauflage: Im oberen Bereich kann die Hand ohne Anpassung problemlos aufrecht gehalten werden (a). Das Übergreifen auf die linke Seite erfordert automatisch ein Drehen der Hand, um den Bereich erreichen zu können; eine zusätzliche Anpassung ist nicht erforderlich (b).

Körperhaltung Es konnten große Unterschiede bezüglich der Hand- und Fingerhaltung beobachtet werden. Die verschiedenen Varianten der Handöffnung reichen von fest oder sogar verkrampt geschlossen erscheinend bis leicht geschlossen über leicht geöffnet bis hin zu komplett geöffnet und stark abgespreizt. Diese unterschiedlichen Haltungen scheinen die empfundene Anstrengung während der Aufgabenausführung ebenfalls zu beeinflussen. In den Pausen zwischen den Trials oder den Hauptteilen konnten besonders bei den „verkrampteren“ Versuchspersonen Bewegungen und Übungen zur Lockerung der Hände beobachtet werden. Inwiefern sich die Handhaltung auf die Gesamtbeurteilung der Ermüdung auswirkt, müsste untersucht werden. Dieser Faktor ist individuell und durch das Interface-Design nicht zu beeinflussen. Jedoch könnten Nutzungshinweise diesbezüglich gegebenenfalls hilfreich sein.

Da die Instruktion an alle Versuchspersonen lautete, eine „bequeme“ und „natürliche Haltung“ während der Ausführung einzunehmen, könnte die praktisch bei allen beobachtete Linksneigung des Körpers als *bequem* und *natürlich* gewertet werden. Durch die Linksneigung vergrößern die Versuchspersonen die Reichweite ihrer Armbewegungen und minimieren die Bewegungseinschränkung durch den eigenen Oberkörper. Bachynskyi et al. (2015) bestätigen dies, da sie ebenso beobachteten, dass sich die Versuchspersonen entweder links abstützten (Arملهne oder Bein) oder beide Arme während des ganzen Experiments auf dem Tisch ruhen ließen. Da nicht alle Versuchspersonen sich diesbezüglich gleichermaßen verhalten haben, ist dies ebenfalls ein individueller Faktor, der die interindividuelle Vergleichbarkeit einschränkt. Eine experimentell kontrollierte Anordnung könnte den Einfluss der Körperneigung auf die Multitouch-Nutzung untersuchen.

Individuelle Faktoren Schnelligkeit erfordert beim Dragging eine Beschleunigung. Diese muss vor bzw. bei Erreichen des Zielbereichs abgebremst werden. Die Versuchspersonen, die sehr schnell arbeiteten, hatten dadurch oft das Problem von überschießenden Bewegungen, die entweder durch eine zeitraubende Rückwärtsbewegung korrigiert werden mussten oder zu einer Vielzahl von Fehlern führte. Beim genauen Arbeiten entstanden entweder gar keine oder nur sehr wenige (eigenverschuldete) Fehler dieser Art.

Ein weiterer Grund für überschießende Bewegungen liegt darin, dass einige Versuchspersonen das Lösen der Aufgaben als Herausforderung ansehen. Diese Interpretation sorgte teilweise für Ehrgeiz und Zielstrebigkeit, was sich entweder in Ärger oder Rechtfertigungen beim Auftreten von Fehlern zeigte. Explizite Äußerungen wie „Challenge“, „Rekorde müssen her“, „meine Zeiten jedes mal unterbieten“ belegen diese Einstellung. Ein solches Verhalten könnte durch die Anzeige der letzten individuellen im Gegensatz zur Durchschnittszeit provoziert worden sein. Inwiefern sich eine derartige Anzeige in dieser Form auswirkt, muss an anderer Stelle beantwortet werden. Jedoch muss dies generell bei der Analyse und Interpretation von Fehlerquoten berücksichtigt werden. Denn diese scheint zumindest in der vorliegenden Studie in starkem Maße von der Persönlichkeit und dem Aufgabenverständnis abzuhängen. Dadurch hat die Fehlerquote hier nur eine begrenzte Aussagekraft als Indikator für die Performanz des Multitouch. Deshalb wurde auf einen interindividuellen Vergleich der Fehlerquote verzichtet.

Für die eingangs formulierten Forschungsfragen können daraus folgende Schlüsse gezogen werden:

F4: Ist die Originalformulierung von Fitts' Gesetz ausreichend, um Interaktionszeiten für Multitouch adäquat vorherzusagen?

Die systematische Untersuchung der Translationsbewegung auf einem Multitouch-Display hat gezeigt, dass Fitts' Gesetz – und damit auch die bisherigen Performanzmaße – zumindest für Multitouch-Displays nicht ausreichen, um die Performanz und die Effizienz adäquat vorherzusagen. In der Konsequenz müssen diese erweitert werden, wenn genauere Vorhersagen und Bewertungen getroffen werden sollen.

F7: Kann die schnelle Ermüdung bei der Nutzung von Multitouch verhindert werden?

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien zeigen, dass bei einem horizontal geneigten Multitouch-Display die subjektiv empfundene Ermüdung und Anstrengung geringer ist als bei einem vertikal geneigten Multitouch-Display. Somit ist das *Gorilla-Arm-Syndrom* kein zwingender Effekt bei der Nutzung eines Multitouch-Display und kann durch die Wahl der Neigung des Multitouch-Display verhindert werden. Zusätzlich sprechen die Ergebnisse der Studien dafür, dass durch eine gezielte Bedienung über kürzere kinematische Ketten die Ermüdung insbesondere bei vertikal geneigten Multitouch-Displays reduziert werden kann.

7.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Studie vorgestellt, die anhand der Standardinteraktionstechnik *Dragging* (Cockburn et al., 2012) systematisch die Performanz und Ergonomie von Translationsbewegungen auf Multitouch untersuchte. Die Aufgabe bestand darin, ein Objekt von einer bestimmten Position an einen Zielort zu verschieben. Dabei variierten die Startpunkte, Bewegungsrichtungen, die Distanzen zum Ziel sowie die Neigung des Multitouch-Display. Im Anschluss an die Untersuchung wurden die Versuchspersonen mit einem Fragebogen u. a. zu Ermüdung

und ihren Präferenzen bezüglich der Neigung befragt. Performanzuntersuchungen auf Basis des *Throughput* zeigten, dass ein horizontal geneigtes Multitouch-Display insgesamt eine höhere Performanz aufweist und diese sich innerhalb der Display-Bereiche stärker unterscheidet als bei der vertikalen Neigung. Unabhängig von der Display-Neigung sind Bewegungen, die aus der linken Displayhälfte starten, performanter. Gleiches gilt für Aufwärtsbewegungen aus der unteren Display-Hälfte. Entgegengesetzte Ergebnisse bisheriger Studien deuten auf eine höhere Komplexität der verwendeten Translation durch Beteiligung von Rotation und 2-Finger-Einsatz hin. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass die Performanz von *Dragging* auf Multitouch von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird. Die Erkenntnisse liefern Optimierungspotenzial für Designentscheidungen, wobei das Ausmaß der Vorteile und das Zusammenspiel mit Ästhetik noch nicht hinreichend untersucht ist. In Bezug auf die kinematischen Ketten werden bei horizontaler Display-Neigung bedeutend mehr kurze kinematische Ketten verwendet. Diese sind performanter als lange kinematische Ketten, was die höhere Performanz sowie die geringere Ermüdung und das weniger verkrampfte Arbeiten beim horizontal geneigten Multitouch-Display erklärt. Im subjektiven Gesamturteil wird die horizontale Neigung durch die Versuchspersonen bevorzugt, da die empfundene Anstrengung beim Arbeiten am vertikal geneigten Display sehr viel höher ist. Die Erkenntnisse bieten Ansätze, um dem *Gorilla-Arm-Syndrom* entgegenzuwirken und Nutzungsempfehlungen für Multitouch-Interaktionen auszusprechen, um eine optimale Nutzung zu gewährleisten. Das angepasste Fitts Modell kann die Verläufe real gemessener Zeiten deutlich besser und differenzierter vorhersagen als das ursprüngliche Fitts Modell. Letzteres ist deshalb nicht ausreichend, um Multitouch-Interaktionstechniken und Interfaces adäquat zu bewerten. Demnach sollte zukünftig für jedes neue Interface überprüft werden, ob eine Anpassung erforderlich ist. Entsprechende Anpassungen für Multitouch könnten eine teilautomatisierte Bewertung von Interaktionstechniken ermöglichen. Diese Studie erweitert die Erkenntnisse zur Translation per *Dragging* und liefert darüber hinaus allgemeine Erkenntnisse, die Entwicklung, Design und Nutzung von Multitouch-Interaktionen verbessern können.

Das folgende Kapitel beschließt diese Arbeit mit einer Zusammenfassung der wissenschaftlichen Beiträge aus den vorgestellten Studien und einem Ausblick über zukünftigen Arbeiten.

Zusammenfassung

„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“

Aristoteles, 384–322 v. Chr., griechischer Philosoph

Dieses Kapitel schließt die Arbeit mit einer abschließenden Diskussion und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten ab. Innerhalb der Diskussion werden einzelne Forschungsfragen beantwortet und die Ergebnisse der Arbeit vor dem Hintergrund verwandter Forschung diskutiert. Basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen werden zusätzliche Fragen und Forschungsschwerpunkte identifiziert, die als Grundlage für weiterführende Arbeiten dienen können.

8.1. Abschließende Diskussion

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis von Interaktionen mit Multitouch-Displays. Sie setzt neue Impulse für Praxis und Wissenschaft, um Multitouch-Displays effizienter und intuitiver einsetzen zu können. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit können als Basis zur Entwicklung einer Guideline zum Design von Interfaces bzw. Interaktionstechniken für Multitouch-Displays angesehen werden.

Um sich diesem Ziel zu nähern, wurden grundlegende Zwischenziele in Form von acht Forschungsfragen formuliert. Diese wurden aus den drei Kategorien abgeleitet, die nach Foley et al. (1984) und dem *DIN EN ISO 9241*-Standard (Deutsches Institut für Normung, 2006) als essentiell gelten, um optimale und gebrauchstaugliche Benutzerinterfaces zu entwickeln: Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. Die formulierten *Forschungsfragen F1–F8* wurden wie folgt eingegliedert und beantwortet:

Effektivität

F1: Sind unerfahrene Multitouch-Nutzer überhaupt in der Lage, gleichzeitig mehrere Freiheitsgrade mit den Fingern zu kontrollieren?

Die komplexen Aufgaben aus Kapitel 4 erforderten eine Multi-Finger-Koordination beider Hände, die zusammen die gleichzeitige Manipulation von acht Freiheitsgraden (Degrees of Freedom, DoF) ermöglichten. Diese Aufgaben können von unerfahrenen Nutzern effektiv, effizient und mit Zufriedenheit gelöst werden: Die objektiv gemessene Leistung bei der Nutzung des Multitouch-Display entspricht derjenigen von Maus und Tastatur. Subjektiv wird die Leistung mit Multitouch-Display höher als diejenige mit Maus und Tastatur eingeschätzt. Die Konvergenz der Ausführungszeiten über alle Versuchspersonen hinweg nach spätestens drei Sitzungen deutet darauf hin, dass der Umgang mit dem komplexen Interface schnell erlernt werden kann. All dies belegt, dass selbst unerfahrene Multitouch-Benutzer durchaus in der Lage sind, Interfaces mit mehreren Fingern gleichzeitig erfolgreich zu bedienen.

Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die Eignung der Interaktionstechniken für die jeweilige Aufgabe essentiell ist. Kin et al. (2009) zeigten, dass ihre Versuchspersonen bei Selektionsaufgaben an einem Multitouch-Display häufig Zeige- und Mittelfinger einsetzten. Was für vergleichsweise einfache Aufgabe der Selektion gilt, kann jedoch nicht automatisch auf andere Aufgaben bzw. Interaktionstechniken übertragen werden: Beispielsweise zeigten die Vorstudien zu Kapitel 4, dass eine Dragging-Aufgabe für die Benutzer mit einem Drei-Finger-Interface – zu steuern über Daumen, Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand – nur schlecht zu lösen waren. Über mehrere Sitzungen hinweg steigerte sich zwar die Kompetenz der Nutzer, jedoch empfanden sie die Steuerung weiterhin als unangenehm und lehnten sie daher ab. Die hohe Akzeptanz durch die Versuchspersonen in der finalen Version des Multitouch-Interface in Kapitel 4 demonstriert, dass das richtige Design, nicht nur die Effektivität, sondern auch die Effizienz und Zufriedenheit der Benutzer deutlich beeinflusst. Der Vergleich dieser Ergebnisse mit denen von Kin et al. (2009) macht deutlich, dass für jede Aufgabe der Einsatz der Finger und somit das Interface-Design neu überprüft werden muss.

F2: Erfolgt die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch koordiniert?

Die Quantifizierung der Koordination mit dem neuentwickelten Maß aus Kapitel 4 zeigt, dass die koordinative Leistung mit dem Multitouch-Display höher ist als die mit Maus und Tastatur. Daran ist zu erkennen, dass Benutzer die Stärken und Vorteile eines Multitouch-Display bewusst einsetzen können und es nicht einfach nur *mausäquivalent* verwenden. Denn wäre dies der Fall, hätten die DoF genau wie bei Maus und Tastatur sequentiell bedient werden müssen. Dadurch sind die Versuchspersonen nach wenigen Sitzungen in der Lage, das Multitouch-Display intuitiv und korrekt zu verwenden. Auch die Stimmigkeit und Qualität der koordinativen Leistungen bei der Kreativ-Aufgabe bestätigen, dass die Versuchspersonen das Interface sehr gut unter Kontrolle hatten. Subjektiv empfanden sich die Versuchspersonen mit dem Multitouch-Display schneller als mit Maus und Tastatur. Dies deutet auf ein Erfolgserlebnis bei der Aufgabenbewältigung hin und ist daher ebenfalls als Bestätigung einer hohen Koordination mit dem Multitouch-Display anzusehen –

insbesondere da sich objektiv keine signifikanten Unterschiede in den Ausführungszeiten feststellen ließen. Diese subjektive Selbsteinschätzung der Versuchspersonen als kompetent ist eine Grundvoraussetzung, um ein neues Eingabegerät oder Interaktionstechnik langfristig etablieren zu können (Leftheriotis und Chorianopoulos, 2011; Shneiderman und Plaisant, 2004).

Das in diesem Zusammenhang entwickelte Koordinationsmaß kann zukünftig verwendet werden, um Interface-Designs, Interaktionstechniken oder Eingabegeräte miteinander zu vergleichen. Zhai und Milgram (1998) definieren die zusätzliche Betrachtung der Koordination als notwendig, um ein tieferes Verständnis für Eingabegeräte bzw. Interaktionstechniken zu erhalten. Das eingeführte Koordinationsmaß erweitert das Spektrum bestehender Koordinationsmaße (Balakrishnan und Hinckley, 2000; Jacob et al., 1994; Zhai und Milgram, 1998) um die Möglichkeit, natürlich aussehende, freie menschliche Bewegungen zu quantifizieren. In solchen und ähnlich komplexen Aufgaben, die die gleichzeitige Manipulation mehrerer DoF erfordern, ist das Multitouch-Display aufgrund seiner höheren Koordination Maus und Tastatur überlegen und könnte Maus und Tastatur sinnvoll ersetzen.

Allerdings hat das vorgestellte Koordinationsmaß auch eine Schwäche: Gezielte Bewegungen, die sich nur innerhalb einer Achse oder Ebene abspielen, werden als unkoordiniert bewertet. Dieses Problem ließe sich ggf. durch die Einbindung des Optimalpfades nach Zhai und Milgram (1998) beheben. Somit könnte ein angepasstes Koordinationsmaß folgendermaßen aussehen:

$$C_{neu} = \frac{C_{\Delta t} + \left(\frac{\text{Länge des Bewegungspfades} - \text{Länge des kürzesten Pfades}}{\text{Länge des kürzesten Pfades}} \right)}{2} \quad (8.1)$$

Sofern die Länge des Bewegungspfades länger als der kürzeste Pfad ist, wird das Koordinationsmaß dementsprechend angepasst. Handelt es sich hingegen um freie Bewegungen ohne Referenzpfad, kann der Faktor für die Pfadlänge auf 0 gesetzt werden und geht somit nicht in die Berechnung ein. Ob eine andere Gewichtung aussagekräftiger wäre als die hier gewählte Gleichgewichtung beider Faktoren, müsste jedoch validiert werden.

Effizienz

F3: Verschlechtert sich die Effizienz durch die gleichzeitige Kontrolle von mehreren Freiheitsgraden mit Multitouch im Vergleich zu Maus und Tastatur?

Die Analyse der Ausführungszeiten in Kapitel 4 zeigt, dass Multitouch-Display und Maus und Tastatur die gleiche Effizienz in den Vergleichsaufgaben aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass das Multitouch-Display bei komplexen Aufgaben, die die Steuerung von mehreren DoF erfordern, ohne Leistungseinbußen Maus und Tastatur ersetzen kann – sogar für Nutzer ohne jegliche Vorerfahrung.

Cockburn et al. (2012) und Sasangohar et al. (2009) sowie Forlines et al. (2007) konnten für ein- bzw. zweidimensionale Interaktionen zeigen, dass das Multitouch-Display bei der einfachen Aufgabe der Selektion schneller ist als Maus und Tastatur, während das

Multitouch-Display jedoch bei der schwierigeren Aufgabe Dragging langsamer ist. Eine weitere Steigerung der Aufgabenkomplexität führt jedoch nicht zwangsweise zu einer Einschränkung der Effizienz. Das belegt die hier beobachtete Gleichheit der Ausführungszeiten von Multitouch-Display und Maus und Tastatur bei einer deutlich komplexeren Aufgabe als dem Dragging. Es besteht also kein linearer Zusammenhang zwischen der Effizienz und der Anzahl der DoF. D. h. die gleichzeitige Kontrolle mehrerer DoF mit dem Multitouch-Display – und die somit erhöhte Komplexität – verschlechtern nicht unbedingt die Effizienz gegenüber Maus und Tastatur.

Dies legt erneut nahe, dass die Aufgaben und deren Anforderungen genau analysiert und beim Interface-Design berücksichtigt werden müssen. Cockburn et al. (2012) erklären die Unterschiede in der Leistung zwischen Multitouch-Display und Maus und Tastatur damit, dass die Reibung des Fingers beim Dragging die Effizienz des Multitouch-Display benachteiligt. Reibung ist jedoch auch bei der hier vorliegenden Aufgabe ein Einflussfaktor, verursacht jedoch trotzdem keine Unterschiede. Dies könnte nach Forlines et al. (2007) darauf zurückzuführen sein, dass sich die jeweiligen Vor- und Nachteile von Multitouch-Display und Maus und Tastatur aufheben – d. h. der Nachteil des Multitouch-Display in einer Dragging-Aufgabe hebt den Vorteil der gleichzeitigen Veränderbarkeit mehrerer DoF auf. Differenziertere Untersuchungsdesigns könnten hier Aufschluss geben, um das Ausmaß bestimmen zu können, inwieweit sich Effekte gegenseitig aufheben bzw. wie dies verhindert und ein echter Vergleich der Effizienz verschiedener Eingabegeräte ermöglicht werden kann.

Zusätzliche Forschung in diese Richtung ist insbesondere deshalb wichtig, da beispielsweise Ben-Bassat et al. (2006) und Nielsen und Levy (1994) eine hohe Effizienz als entscheidend für die langfristige Akzeptanz eines Interface ansehen. Sie beobachteten, dass die Effizienz einer Software ausschlaggebender ist als deren Ästhetik. Dies gilt im Besonderen, wenn Benutzer die ästhetisch ansprechendere Software als weniger effizient empfinden und einen monetären Verlust zu befürchten haben. In den Interviews aus Kapitel 4 bestätigten die Angaben der Versuchspersonen die Aussagen von Ben-Bassat et al. (2006): Nachdem sich die anfängliche Begeisterung für das neue Interface und die Möglichkeiten des Multitouch-Display gelegt hatten, konzentrierten sie sich auf die schnelle Aufgabenlösung.

F4: Ist die Originalformulierung von Fitts' Gesetz ausreichend, um Interaktionszeiten für Multitouch adäquat vorherzusagen?

Diese Arbeit zeigt, dass neben der Distanz zum Ziel (*Distanz*) sowie der Größe des Ziels (*Zielgröße*) weitere Faktoren die Performanz beim Dragging auf einem Multitouch-Display beeinflussen. Dies konnte für Startposition, Display-Neigung und Bewegungsrichtung innerhalb der Studie in Kapitel 7 nachgewiesen werden. Damit konnte erstmals anhand einer systematischen Untersuchung gezeigt werden, dass Fitts' Gesetz – und damit auch die bisherigen Performanzmaße – zumindest für Multitouch-Geräte nicht ausreichen, um Performanz oder Effizienz adäquat vorherzusagen. In der Konsequenz müssen diese erweitert werden. Weitere systematische Untersuchungen für andere Eingabegeräte könnten klären, inwiefern sie allgemein erweitert werden müssen.

Frühere Arbeiten wiesen bereits darauf hin, dass die Performanzmaße gegebenenfalls nicht ausreichen könnten, untersuchten dies jedoch nicht weiter (Weiss et al., 2010). Bislang befassten sich Forscher überwiegend mit der Erweiterung von Fitts' Gesetz: Entweder um weitere Interaktionstechniken wie Rotation und Skalierung (Stoelen und Akin, 2010; Zhao et al., 2015), um höhere Dimensionen (Hoffmann et al., 2011; MacKenzie und Buxton, 1992) oder um die Anwendung bei bekannten Aufgaben auf neuen Eingabegeräten – wie Selektion auf Multitouch-Display (Bi et al., 2013). Dabei berücksichtigen sowohl Fitts' Gesetz als auch die darauf basierenden Performanzmaße ausschließlich die *Distanz* und *Zielgröße* für die Berechnung der Performanz.

Eine Anpassung ist dringend erforderlich, da Fitts' Gesetz bzw. die bestehenden Performanzmaße als Standardwerkzeuge gelten, um Interaktionstechniken (Ahlström, 2005; Gillan et al., 1990; Kabbash und Buxton, 1995; Luo und Vogel, 2014; Stoelen und Akin, 2010) und Eingabegeräte (Epps, 1986; Forlines und Balakrishnan, 2008; Forlines et al., 2007; Po et al., 2004; Sasangohar et al., 2009; Tubb und Dixon, 2015; Vertegaal, 2008) miteinander zu vergleichen. Diese Vergleiche erfolgen nicht nur in wissenschaftlichen Publikationen, sondern auch in der Praxis in Form des ISO-Standards „DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion Teil 11 Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit“ (Deutsches Institut für Normung, 2006). Dieser internationale ISO-Standard definiert Prüfverfahren auf Basis von Fitts' Gesetz, um Interaktionstechniken und Benutzer-Interfaces zu evaluieren. Durch die Erweiterung und spezifische Anpassung von Fitts' Gesetz können Interaktionstechniken und Eingabegeräte somit gezielter optimiert und eingesetzt werden. Dies ist essentiell, um Multitouch-Displays weiter etablieren zu können. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Ergebnisse dieser Arbeit an einer größeren Stichprobe und unter Berücksichtigung weiterer Faktoren zu validieren.

Zusätzlich können Modelle mit exakten Vorhersagen für Effizienz oder Performanz verwendet werden, um teilautomatisch Benutzeroberflächen zu analysieren und zu bewerten.

F5: Spielt die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation bei Multitouch eine Rolle für die Effizienz?

Diese Arbeit zeigt, dass kombinierte Bewegungen, bei denen die Translation nach rechts verläuft, schneller sind als Bewegungen, bei denen die Translation nach links verläuft. Dies gilt unabhängig von der Richtung der Rotation. Somit müssen Interfaces, die diese Interaktionstechnik einsetzen, Elemente so anordnen, dass beim Dragging entweder Rechtsbewegungen präferiert oder die Benutzer bei Linksbewegungen unterstützt werden. Nur so kann eine optimale Effizienz gewährleistet werden

Diese Ergebnisse bestätigen und ergänzen bestehende Arbeiten: Olafsdottir et al. (2014) beobachteten in ihren Untersuchungen ebenfalls, dass linksgerichtete Rotations-Translations-Bewegungen (RT) für die Versuchspersonen am schwierigsten sind. Allerdings wurde die Messung der Effizienz hier nicht als Indikator berücksichtigt, sondern stattdessen die Planungszeit (Reaktionszeit) verwendet, die zum Ausführen der RT benötigt wurde. Zhao et al. (2015) untersuchten hingegen Rotations-Skalierungs-Translations-Bewegungen (RST)

auf einem größeren, horizontalen Multitouch-Display. Ihre Ergebnisse zeigen auch, dass für RST rechtsgerichtete Bewegungen schneller sind als linksgerichtete.

F6: Haben auf Multitouch die Standardinteraktionstechniken für Translation und Rotation die gleiche Performanz?

Der Vergleich des Index of Performance (IP) in Kapitel 5 belegt, dass die Standardinteraktionstechnik für Translation performanter ist als die Standardinteraktionstechnik für Rotation. Die Bestimmung der Performanz von Interaktionstechniken ist relevant, um die Interaktionstechniken grundlegend zu verstehen. Nur dadurch können sie für die unmittelbare Nutzung optimiert werden oder unterstützende Hilfsmittel für die Benutzer (Hoggan et al., 2013b) bereitgestellt werden. Somit lässt sich die Zufriedenheit bei der Interaktion verbessern (Olafsdottir et al., 2014).

Diese Arbeit legt beispielsweise nahe, dass beim Entwurf von Interfaces möglichst auf die weniger performanteren Rotationsbewegungen nach der *2-Punkt-RT*-Technik verzichtet werden sollte. Denn die Verwendung von performanteren Interaktionstechniken steigert die Zufriedenheit der Nutzer mit einem Interface. Aus diesem Grund sollte die Forschung nach weiteren Alternativen vorangetrieben werden. Beispielsweise haben Hancock et al. (2009) mit *Sticky Finger* oder Reisman et al. (2009) mit *Screen-Space* bereits Alternativtechniken für 3-D-Interaktionen entwickelt, die ohne die *2-Punkt-RT*-Technik auskommen können. Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, Rotationsbewegungen der Nutzer komplett zu vermeiden, indem Interaktionstechniken eingesetzt werden, die die Rotation eines Objekts mit Hilfe von Translationsbewegungen ermöglichen. Diesbezüglich berichten beispielsweise Kruger et al. (2005) und Hancock et al. (2007) von guten Ergebnissen.

Stoelen und Akin (2010) haben für sensorbasierte Systeme eine gleiche Performanz für Translation und Rotation messen können. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen dies für Multitouch-Display allerdings nicht. Dies zeigt, dass Ergebnisse von Untersuchungen zu Interaktionstechniken in der Regel nicht auf andere Eingabegeräte übertragen werden können und deshalb für jedes Eingabegerät neu validiert werden müssen.

Zufriedenheit

F7: Kann die schnelle Ermüdung bei der Nutzung von Multitouch verhindert werden?

Die schnelle Ermüdung bei vertikalen Multitouch-Displays wird als *Gorilla-Arm-Syndrom* bezeichnet (Computer Dictionary Online, 2015) und rückten in den letzten Jahren immer weiter in den Vordergrund (Bachynskyi et al., 2015; Hincapié-Ramos et al., 2014; Loi, 2013). Eine Lösung dieses Problems ist aus praktischer Sicht essentiell, um Multitouch-Displays langfristig zu etablieren (Carmody, 2010). Zusätzliche Studien könnten zudem untersuchen, ob durch gezieltes Trainieren und Einsetzen von kürzeren kinematischen Ketten die Ermüdung und *Gorilla-Arm-Syndrom* auch bei vertikal aufgestellten Multitouch-Displays reduziert oder sogar vermieden werden kann.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien aus Kapitel 7 zeigen, dass bei einem horizontal geneigten Multitouch-Display die subjektiv empfundene Ermüdung und Anstrengung geringer ist als bei einem vertikal geneigten Multitouch-Display. Somit ist das *Gorilla-Arm-Syndrom* kein zwingender Effekt bei der Nutzung eines Multitouch-Display und kann durch die Wahl der Neigung des Multitouch-Display verhindert werden. Zusätzlich sprechen die Ergebnisse der Studien dafür, dass durch eine gezielte Bedienung über kürzere kinematische Ketten die Ermüdung insbesondere bei vertikal geneigten Multitouch-Displays reduziert werden kann. Das *Gorilla-Arm-Syndrom* muss unbedingt verhindert werden, da körperliches Unbehagen bei der Nutzung eines Eingabegeräts dessen Akzeptanz verhindert (Loi, 2013). Daher sollten vermeidende Faktoren – wie Display-Neigung und die Länge der verwendeten kinematischen Kette – beim Design von Interfaces und Interaktionstechniken unbedingt berücksichtigt werden.

Damit unterstützen die vorliegenden Erkenntnisse insbesondere die Bestrebungen, horizontal geneigte Multitouch-Displays als zusätzliches Eingabegerät zu etablieren (Bi et al., 2011). Darüber hinaus werden hiermit auch Bedingungen für den Erfolg einer Integration von vertikalen und horizontalen Multitouch-Displays zu einer Arbeitsfläche (Weiss et al., 2010; Wimmer et al., 2010) geliefert. Bei solchen Systemen sollte aufgabenbezogen zwischen vertikalem und horizontalem Display gewechselt werden. Das Auslagern bestimmter Aufgaben auf die horizontale Arbeitsfläche könnte für optimale Effizienz und geringere Ermüdung sorgen. Solche Systeme verwenden meist jedoch sehr große Multitouch-Flächen, daher müsste überprüft werden, inwiefern sich die Ergebnisse dieser Studie auch für große Multitouch-Displays bestätigen lassen.

Weitere Untersuchungen könnten zudem statt einer qualitativen Analyse, objektive Messungen mit Sensoren durchführen, um quantitativ bestimmbare Werte für Ermüdung zu erhalten. Beispielsweise könnte das *Endurance*-Maß von Hincapié-Ramos et al. (2014) in Kombination mit Sensoren wie von Lozano et al. (2011) verwendet werden. Alternativ könnten auch Motion-Capture-Systeme dafür eingesetzt werden (Bachynskiy et al., 2015).

F8: Wirkt sich die Richtung der Teilbewegungen bei kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation auch auf die Schwierigkeit der Interaktionstechnik aus?

Die vorliegenden Ergebnisse aus Kapitel 6 zeigen, dass bei gleichgerichteten Teilbewegungen einer kombinierten Bewegungen aus Rotation und Translation weniger Strategiewechsel während der Ausführung auftreten und dies zu einem eindeutigen Verhalten der Benutzer führt. Dies deutet darauf hin, dass die Richtung der Teilbewegungen die Intuitivität einer Interaktionstechnik folgendermaßen beeinflusst: Gleichgerichtete Teilbewegungen sind für Benutzer intuitiver und sollten deshalb beim Design von Interfaces präferiert werden.

Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Olafsdottir et al. (2014) zur Planung von Interaktionen auf dem Multitouch-Display: Sie beobachteten unterschiedliche Planungsstrategien innerhalb derselben Aufgabe. Zusätzlich stellten sie fest, dass Bewegungen nach links sowie Rotationen *gegen den Uhrzeigersinn* am schwierigsten für die Versuchspersonen waren. Ebenso werden die Ergebnisse von Hoggan et al. (2013b) bestätigt, die für reine Rotationsaufgaben ebenfalls zeigten, dass Rotationen auf der kontralateralen Seite, d. h.

sich auf der gegenüberliegenden Hälfte in Bezug der dominanten Hand befindet, *gegen den Uhrzeigersinn* am langsamsten sind. Auf der ipsilateralen Seite, d. h. auf der Seite der dominanten Hand, die Rotationen *im Uhrzeigersinn* die langsamsten sind. In Kombination mit Translationsbewegungen entspricht das den bidirektionalen Bewegungen.

Bedeutung für die übergeordnete Forschungsfrage

Die Antworten auf diese acht Forschungsfragen tragen in ihrer Gesamtheit zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage bei:

Wie können intuitive und effiziente Interaktionstechniken entwickelt werden?

In dieser Arbeit konnte bereits in Kapitel 4 gezeigt werden, dass die „Gulf of Competence“ mit einem entsprechendem Interface-Design schnell überwunden werden kann: Schon nach spätestens drei Sitzungen konvergieren die Ausführungszeiten von Multitouch-Display und Maus und Tastatur zu einer gemeinsamen Asymptote, was durch die höhere Koordination beim Multitouch-Display noch an Bedeutung gewinnt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass unter geeigneten Voraussetzungen nur geringe *Kosten* und somit keine Hindernisse für eine Etablierung des Multitouch-Display bestehen.

Die Antworten auf die einzelnen Forschungsfragen verschaffen einen Überblick über einige dieser Voraussetzungen. Daraus lassen sich mit Blick auf Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bereits Ansätze extrahieren, die beim Design von Multitouch-Benutzerinterfaces und Interaktionstechniken berücksichtigt werden sollten. Beispielsweise sollten die verschiedenen Bildschirmzonen entsprechend ihrer Performanz ausgenutzt werden, die im linken Display-Bereich insgesamt höher und in der Ecke unten links maximal ist. Der Einsatz kurzer kinematischer Ketten sollte begünstigt werden, insbesondere unter dem Aspekt einer geringeren Ermüdung. Mit Blick auf die Usability sollte zudem die Verwendung von mehr als zwei Fingern pro Hand vermieden werden. Auf Rotationen sollte weitestgehend verzichtet werden, beispielsweise indem sie durch die einfacheren Translationen ersetzt werden. Dabei sollte jedoch die Bewegungsrichtung beachtet werden, da Translationen von links nach rechts sowie von unten nach oben performanter sind. Auch Interaktionstechniken, die bidirektionale Fingerbewegungen erfordern, sollten weniger oft eingesetzt werden, da sie schwieriger und somit weniger benutzerfreundlich sind. Wenn sie jedoch eingesetzt werden, sollten es rechtsgerichtete sein, da sie eine höhere Effizienz aufweisen. Horizontal geneigte Multitouch-Displays sollten in Verbindung mit einem Interface genutzt werden, das ein nahes Arbeiten am Körper ermöglicht. Der Hauptarbeitsbereich sollte dabei im unteren und linken Display-Bereich liegen, da dieser am besten und effizientesten erreichbar ist. Bei vertikal geneigten Multitouch-Displays sollten Interaktionen im rechten unteren Display-Bereich vermieden werden, da er aufgrund anatomischer Gegebenheiten nur schlecht zu erreichen ist.

Aufbauend auf diesen Ansätzen ist weitere Forschung möglich, die langfristig zu einer Guideline für das Design von intuitiven, performanten und effizienten Multitouch-Interfaces und Interaktionstechniken führt. Dies ermöglicht die Schwächen derzeitiger Standardinteraktionstechniken zu überwinden und eindeutig zu definieren, worauf bei der Entwicklung

von Interaktionstechniken geachtet werden soll (Banovic et al., 2011; Olafsdottir et al., 2014; Zhao et al., 2015).

8.2. Zukünftige Arbeiten

Mit dieser Arbeit konnte in Bezug auf einige grundlegende Fragen ein besseres Verständnis dafür geschaffen werden, wie Multitouch-Interaktionen optimiert werden können, um sie in alltägliche Computerumgebungen zu integrieren. Als Beitrag zur Grundlagenforschung bestehen jedoch vielfach Limitierungen, die einige Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten bieten.

Effektivität

- Da in Kapitel 4 ein intuitives Interface entwickelt werden sollte, wurde es lediglich an unerfahrenen Nutzern getestet. Wie groß die Vorteile von Multitouch-Displays im Kontext Bewegungsanimation tatsächlich sind, könnte nur anhand von Experten wie professionellen Animationskünstlern überprüft werden. Zukünftige Arbeiten könnten in diesem Zusammenhang z. B. die Startperformanz und die Lernkurve von professionellen Künstlern mit den aktuellen Ergebnissen unerfahrener Benutzer vergleichen.
- Die hier entwickelte Morph-Map für Handformen erzielte bei einer kleinen Stichprobe gute Ergebnisse. Es könnte eine gute Möglichkeit sein, um die Vielzahl an DoF zu begrenzen, was zukünftig jedoch eine breitere Evaluation erfordern würde. Beispielsweise könnte untersucht werden, ob die Platzierung der Handformen auf dem Raster optimal ist oder ob die Morph-Map generell für eine bimanuale Steuerung geeignet ist.
- Die Evaluation der Animationsergebnisse aus der Kreativ-Aufgabe aus Kapitel 4 erfolgte lediglich quantitativ. Zukünftige Arbeiten sollten zusätzlich einen qualitativen Ansatz verfolgen, die z. B. die Bewertung von Natürlichkeit, Timing und Qualität der Bewegung durch eine unabhängige Jury beinhalten könnte.
- Weiterhin könnte das hier eingeführte Koordinationsmaß zukünftig validiert werden. Beispielsweise könnten Vergleiche mit früheren Koordinationsmaßen oder mit subjektiven Bewertungen von Bewegungen durch neutrale Personen erfolgen.
- Das vorgestellte Koordinationsmaß hat seine Stärken in der Quantifizierung von freien Bewegungen, es beinhaltet jedoch, dass gezielte Bewegungen, die sich nur innerhalb einer Achse oder Ebene abspielen, als unkoordiniert bewertet werden. Dieses Problem könnte in weiterführenden Arbeiten durch die Einbindung des Optimalpfades nach Zhai und Milgram (1998) behoben werden. Inwiefern die darin enthaltene Gewichtung aussagekräftiger ist, müsste gezielt untersucht werden.

Effizienz

- In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass Fitts' Gesetz als Performanzmaß im Bereich Multitouch-Display ergänzt werden muss. Zukünftige Arbeiten könnten das Studiendesign verwenden und die vorliegenden Erkenntnisse zur optimalen Platzierung von Objekten und Funktionen auf Multitouch-Displays erweitern – beispielsweise indem weitere Startpunkte und Konfigurationen bzw. eine Heatmap für Zielpunkte ergänzt werden. Dabei könnten auch Positionseffekte (Verwendung im Stehen/Sitzen/Liegen), Formfaktoren (Reichweitenprobleme bei großen Multitouch-Displays), Effekte von Händigkeit sowie Lese- und Schreibrichtung berücksichtigt werden.
- Ein direkter Vergleich mit weiteren Eingabegeräten wie Maus oder Touchpads anhand des Untersuchungsdesigns aus Kapitel 7 könnte klären, inwieweit es sinnvoll wäre, dasselbe Interface für alle Eingabegeräte zu verwenden. Zusätzlich könnten die auf Fitts' Ansätzen basierenden ISO-Normaufgaben validiert werden, indem sie über den Bildschirm verteilt und mit variierter Neigung des Multitouch-Display durchgeführt werden.
- Um generalisierbare Aussagen machen zu können, könnten hier dargestellte Studien auf das ganze Display ausgedehnt werden (siehe Kapitel 5, Kapitel 6 und Kapitel 7). Mit einer gezielten Untersuchung der Pivotpunkte bei Rotation über das gesamte Multitouch-Display könnte beispielsweise eine Landkarte der möglichen Rotationswinkel erstellt werden. So könnte analysiert werden, inwiefern sich die Anatomie von Hand und Handgelenk die Performanz bei Rechts- bzw. Linkshändern auswirkt. Dementsprechend könnten Rotationstechniken optimiert werden – beispielsweise durch einen Beschleunigungsfaktor in bestimmten Zonen. Gleichmaßen könnten bewährte Interaktionstechniken auf verschiedenen Display-Bereichen untersucht werden (*StickyFinger* (Hancock et al., 2009), *Screen-Space* (Reisman et al., 2009) und *DS3* (Martinet et al., 2010) etc.), um deren Stärken und Schwächen zu identifizieren. Derartige Untersuchungen können dazu beitragen, Designempfehlungen für intuitive und zufriedenstellende Multitouch-Displays zu ermöglichen.

Zufriedenheit

- Die Untersuchung kinematischer Ketten in Kapitel 7 erfolgte post-hoc über Videoanalysen, die nur eine stark subjektive Bewertung ermöglichen. Weiterführende Arbeiten könnten exakte Messinstrumente einsetzen, wie beispielsweise Sensoren zur Erfassung der Muskelaktivitäten oder Motion-Capture-Systeme.
- Indem Versuchspersonen gezielt auf den Einsatz kürzerer kinematischer Ketten trainiert werden, könnte gegebenenfalls das *Gorilla-Arm-Syndrom* vermindert werden. Weitere Arbeiten könnten deshalb den Zusammenhang zwischen Performanz, wahrgenommener Ermüdung und der Verwendung kürzerer kinematischer Ketten beleuchten.

- Anlehnend an Ben-Bassat et al. (2006) bliebe zu klären, ob die Präferenz für das Multitouch-Display auch dann besteht, wenn die Benutzer subjektiv das Gefühl haben langsamer zu sein als mit Maus und Tastatur. Hierfür könnte das visuelle Feedback oder Rückmeldung zu den Zeiten manipuliert werden.

Die Vielzahl möglicher Ansatzpunkte für weitere Forschung zeigt, dass viele Fragen zu Effektivität, Effizienz von und Zufriedenheit mit Multitouch-Displays noch unzureichend beantwortet sind. Diese Arbeit hat im Sinne der Grundlagenforschung einen ersten Beitrag geleistet. Zentrale Fragestellungen wurden beleuchtet und es wurde gezeigt, welche Schwerpunkte weiterhin zu setzen sind, um die Multitouch-Interaktionen sinnvoll und zufriedenstellend in den Arbeitsalltag integrieren zu können.

8.3. Abschließende Bemerkung

Diese Arbeit zeigt, dass die weitere Etablierung des Multitouch-Display als Ergänzung von Maus und Tastatur von vielen Aspekten beeinflusst wird. Noch sind viele theoretische Fragen offen, die die bestehende Grundlagenforschung zu Multitouch-Interaktionen bereichern würden (Achibet et al., 2015; Bi et al., 2011; Olafsdottir et al., 2014; Zhao et al., 2015). Erst in den letzten Jahren vermehren sich wieder praktische Arbeiten, die die Kombination von mehreren Techniken und Eingabegeräten zu einer fließenden Arbeitsumgebung untersuchen und hierbei auch das Multitouch-Display berücksichtigen (Achibet et al., 2015; Bi et al., 2011; Weiss et al., 2010, 2009; Wimmer et al., 2010).

Die Wichtigkeit und Aktualität dieses Forschungsgebietes zeigen die Erfolge der Publikationen aus dieser Dissertation. Die Inhalte konnten erfolgreich auf renommierten internationalen Konferenzen publiziert werden (Kipp und Nguyen, 2010; Nguyen und Kipp, 2014, 2015). Die Publikation der Forschungsergebnisse aus Kapitel 7 wurde darüber hinaus mit einem *Best Paper Award* ausgezeichnet (Nguyen und Kipp, 2015).

Literatur

- Accot, Johnny und Zhai, Shumin (1997). „Beyond Fitts' law“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '97. New York, NY, USA: ACM, S. 295–302.
- Accot, Johnny und Zhai, Shumin (1999). „Performance Evaluation of Input Devices in Trajectory-based Tasks: An Application of the Steering Law“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '99. New York, NY, USA: ACM, S. 466–472.
- Accot, Johnny und Zhai, Shumin (2001). „Scale Effects in Steering Law Tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '01. New York, NY, USA: ACM, S. 1–8.
- Accot, Johnny und Zhai, Shumin (2003). „Refining Fitts' Law Models for Bivariate Pointing“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '03. New York, NY, USA: ACM, S. 193–200.
- Achibet, Merwan, Casiez, Géry, Lécuyer, Anatole und Marchal, Maud (2015). „THING: Introducing a Tablet-based Interaction Technique for Controlling 3D Hand Models“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. New York, NY, USA: ACM, S. 317–326.
- Ahlström, David (2005). „Modeling and Improving Selection in Cascading Pull-down Menus Using Fitts' Law, the Steering Law and Force Fields“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '05. New York, NY, USA: ACM, S. 61–70.
- Albinsson, Pär-Anders und Zhai, Shumin (2003). „High Precision Touch Screen Interaction“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '03. New York, NY, USA: ACM, S. 105–112.
- Andersen, Tue H. (2005). „A Simple Movement Time Model for Scrolling“. In: *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '05. New York, NY, USA: ACM, S. 1180–1183.
- Annett, Michelle und Bischof, Walter F. (2013). „Your Left Hand Can Do It Too! Investigating Intermanual, Symmetric Gesture Transfer on Touchscreens“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 1119–1128.
- Apple (2007). *Apple Reinvents the Phone with iPhone*. URL: <http://www.apple.com/de/pr/library/2007/01/09Apple-Reinvents-the-Phone-with-iPhone.html> (besucht am 02. 09. 2015).
- Arif, Ahmed Sabbir, Pahud, Michel, Hinckley, Ken und Buxton, Bill (2014). „Experimental Study of Stroke Shortcuts for a Touchscreen Keyboard with Gesture-redundant Keys

- Removed". In: *Proceedings of Graphics Interface 2014*. GI '14. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, S. 43–50.
- Avery, Jeff, Choi, Mark, Vogel, Daniel und Lank, Edward (2014). „Pinch-to-zoom-plus: An Enhanced Pinch-to-zoom That Reduces Clutching and Panning“. In: *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '14. New York, NY, USA: ACM, S. 595–604.
- Bachynskyi, Myroslav, Palmas, Gregorio, Oulasvirta, Antti, Steimle, Jürgen und Weinkauf, Tino (2015). „Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study Using Biomechanical Simulation“. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. New York, NY, USA: ACM, S. 1817–1826.
- Balakrishnan, Ravin (2004). „Beating Fitts' Law: Virtual Enhancements for Pointing Facilitation“. In: *Int. J. Human-Computer Studies* 61.6, S. 857–874.
- Balakrishnan, Ravin, Baudel, Thomas, Kurtenbach, Gordon und Fitzmaurice, George (1997). „The Rockin' Mouse: Integral 3D Manipulation on a Plane“. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '97. New York, NY, USA: ACM, S. 311–318.
- Balakrishnan, Ravin und Hinckley, Ken (1999). „The Role of Kinesthetic Reference Frames in Two-handed Input Performance“. In: *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '99. New York, NY, USA: ACM, S. 171–178.
- Balakrishnan, Ravin und Hinckley, Ken (2000). „Symmetric Bimanual Interaction“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '00. New York, NY, USA: ACM, S. 33–40.
- Balakrishnan, Ravin und MacKenzie, Ian S. (1997). „Performance Differences in the Fingers, Wrist, and Forearm in Computer Input Control“. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '97. New York, NY, USA: ACM, S. 303–310.
- Banovic, Nikola, Grossman, Tovi und Fitzmaurice, George (2013). „The Effect of Time-based Cost of Error in Target-directed Pointing Tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 1373–1382.
- Banovic, Nikola, Li, Frank Chun Yat, Dearman, David, Yatani, Koji und Truong, Khai N. (2011). „Design of Unimanual Multi-finger Pie Menu Interaction“. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '11. New York, NY, USA: ACM, S. 120–129.
- Barnes, Connelly et al. (2008). „Video Puppetry: A Performative Interface for Cutout Animation“. In: *ACM Transactions on Graphics* 27.5, 124:1–124:9.
- Baudisch, Patrick, Becker, Torsten und Rudeck, Frederik (2010). „Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '10. New York, NY, USA: ACM, S. 1165–1174.
- Baudisch, Patrick und Chu, Gerry (2009). „Back-of-device Interaction Allows Creating Very Small Touch Devices“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. New York, NY, USA: ACM, S. 1923–1932.
- Beaudouin-Lafon, Michel (2001). „Novel Interaction Techniques for Overlapping Windows“. In: *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Bd. 3. UIST '01 2. New York, NY, USA: ACM, S. 153.

- Ben-Bassat, Tamar, Meyer, Joachim und Tractinsky, Noam (2006). „Economic and Subjective Measures of the Perceived Value of Aesthetics and Usability“. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 13.2, S. 210–234.
- Benko, Hrvoje und Feiner, Steven (2007). „Balloon Selection: A Multi-Finger Technique for Accurate Low-Fatigue 3D Selection“. In: *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, S. 79–86.
- Benko, Hrvoje, Izadi, Shahram, Wilson, Andrew D., Cao, Xiang, Rosenfeld, Dan und Hinckley, Ken (2010). „Design and Evaluation of Interaction Models for Multi-touch Mice“. In: *GI '10 Proceedings of Graphics Interface 2010*, S. 253–260.
- Benko, Hrvoje, Wilson, Andrew D. und Baudisch, Patrick (2006). „Precise Selection Techniques for Multi-Touch Screens“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '06. New York, NY, USA: ACM, S. 1263–1272.
- Bérard, François, Ip, Jessica, Benovoy, Mitchel, El-Shimy, Dalia, Blum, Jeffrey R. und Cooperstock, Jeremy R. (2009). „Did "minority report" get it wrong? Superiority of the mouse over 3D input devices in a 3D placement task“. In: *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction: Part II*. Bd. 5727 LNCS. INTERACT '09 PART 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 400–414.
- Bérard, François und Laurillau, Yann (2009). „Single User Multitouch on the DiamondTouch: From 2 x 1D to 2D“. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '09. New York, NY, USA: ACM, S. 1–8.
- Bi, Xiaojun, Grossman, Tovi, Matejka, Justin und Fitzmaurice, George (2011). „Magic Desk: Bringing Multi-touch Surfaces into Desktop Work“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. New York, NY, USA: ACM, S. 2511–2520.
- Bi, Xiaojun, Li, Yang und Zhai, Shumin (2013). „FFitts Law: Modeling Finger Touch with Fitts' Law“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 1363–1372.
- Blanch, Renaud und Ortega, Michael (2011). „Benchmarking Pointing Techniques with Distractors: Adding a Density Factor to Fitts' Pointing Paradigm“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. New York, NY, USA: ACM, S. 1629–1638.
- Buxton, Bill (1986). „There's More to Interaction than Meets the Eye: Some Issues in Manual Input“. In: *User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*. Hrsg. von Donald A. Norman und Stephen W. Draper. Hillsdale, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates Inc., S. 319–337.
- Buxton, Bill (2014). *Multi-Touch Systems that I Have Known and Loved*. URL: <http://www.billbuxton.com/multitouchOverview.html>.
- Card, Stuart K., English, William K. und Burr, Betty J. (1978). „Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT“. In: *Ergonomics* 21.8, S. 601–613.
- Card, Stuart K., Mackinlay, Jock D. und Robertson, Georg G. (1991). „A Morphological Analysis of the Design Space of Input Devices“. In: *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)* 9.2, S. 122.
- Card, Stuart K., Mackinlay, Jock D. und Robertson, George G. (1990). „The Design Space of Input Devices“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '90. New York, NY, USA: ACM, S. 117–124.

- Card, Stuart K., Newell, Allen und Moran, Thomas P. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc.
- Carmody, Tim (2010). *Why 'Gorilla Arm Syndrome' Rules Out Multitouch Notebook Displays*. URL: <http://www.wired.com/2010/10/gorilla-arm-multitouch> (besucht am 29. 09. 2015).
- Casiez, Gery, Vogel, Daniel, Balakrishnan, Ravin und Cockburn, Andy (2008). „The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks“. In: *Human-Computer Interaction* 23.3, S. 215–250.
- Chen, Michael, Mountford, S. Joy und Sellen, Abigail (1988). „A Study in Interactive 3-D Rotation Using 2-D Control Devices“. In: *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '88, S. 121–129.
- Clarkson, Edward, Lyons, Kent, Clawson, James und Starner, Thad (2007). „Revisiting and Validating a Model of Two-thumb Text Entry“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. New York, NY, USA: ACM, S. 163–166.
- Cockburn, Andy, Ahlström, D. und Gutwin, Carl (2012). „Understanding performance in touch selections: Tap, drag and radial pointing drag with finger, stylus and mouse“. In: *International Journal of Human Computer Studies* 70.3, S. 218–233.
- Cockburn, Andy, Gutwin, Carl und Greenberg, Saul (2007). „A Predictive Model of Menu Performance“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. New York, NY, USA: ACM, S. 627–636.
- Cohé, Aurélie, Dècle, Fabrice und Hachet, Martin (2011). „tBox: A 3D Transformation Widget Designed for Touch-screens“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. New York, NY, USA: ACM, S. 3005–3008.
- Computer Dictionary Online (2015). *Gorilla Arm*. URL: <http://www.computer-dictionary-online.org/index.asp?q=gorilla+arm> (besucht am 29. 09. 2015).
- Crossan, Andrew, Williamson, John, Brewster, Stephen und Murray-Smith, Rod (2008). „Wrist Rotation for Interaction in Mobile Contexts“. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI '08. New York, NY, USA: ACM, S. 435–438.
- Crossman, Edward R. F. W. und Goodeve, P. J. (1983). „Feedback control of hand-movement and Fitts' law“. In: *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A* 35.2, S. 251–278.
- Daiber, Florian, Falk, Eric und Krüger, Antonio (2012). „Balloon Selection Revisited: Multi-touch Selection Techniques for Stereoscopic Data“. In: *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 441–444.
- Deutsches Institut für Normung (2006). *DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion: Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze*.
- Dijkstra, Rob, Perez, Christopher und Vertegaal, Roel (2011). „Evaluating effects of structural holds on pointing and dragging performance with flexible displays“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 1293–1302.
- Dontcheva, Mira, Yngve, Gary und Popović, Zoran (2003). „Layered acting for character animation“. In: *ACM Transactions on Graphics*. SIGGRAPH '03 22.3, S. 409.
- Dunlop, Mark und Levine, John (2012). „Multidimensional Pareto Optimization of Touchscreen Keyboards for Speed, Familiarity and Improved Spell Checking“. In: *Proceedings*

- of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 2669–2678.
- Epps, Brian W. (1986). „Comparison of Six Cursor Control Devices Based on Fitts' Law Models“. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 30.4, S. 327–331.
- Fares, Ribel, Fang, Shaomin und Komogortsev, Oleg (2013). „Can we beat the mouse with MAGIC?“ In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, New York, USA: ACM Press, S. 1387.
- Fernquist, Jennifer, Shoemaker, Garth und Booth, Kellogg S. (2011). „“Oh Snap” – Helping Users Align Digital Objects on Touch Interfaces“. In: *Human-Computer Interaction – INTERACT 2011*. Hrsg. von Pedro Campos, Nicholas Graham, Joaquim Jorge, Nuno Nunes, Philippe Palanque und Marco Winckler. Bd. 6948. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 338–355.
- Fitts, Paul Morris (1954). „The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement“. In: *Journal of Experimental Psychology* 47.6, S. 381–391.
- Fitts, Paul Morris und Peterson, James R. (1964). „Information Capacity of Discrete Motor Responses“. In: *Journal of Experimental Psychology* 67.2, S. 103–112.
- Foley, James D., Wallace, Victor L. und Chan, Peggy (1984). „The Human Factors of Computer Graphics Interaction Techniques“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 4.11, S. 13–48.
- Forlines, Clifton und Balakrishnan, Ravin (2008). „Evaluating Tactile Feedback and Direct vs. Indirect Stylus Input in Pointing and Crossing Selection Tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '08. New York, NY, USA: ACM, S. 1563–1572.
- Forlines, Clifton, Shen, Chia, Vernier, Frédéric und Wu, Mike (2005). „Under My Finger: Human Factors in Pushing and Rotating Documents Across the Table“. In: *Human-Computer Interaction - INTERACT 2005*. Hrsg. von MariaFrancesca Costabile und Fabio Paternò. Bd. 3585. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 994–997.
- Forlines, Clifton, Wigdor, Daniel, Shen, Chia und Balakrishnan, Ravin (2007). „Direct-touch vs. Mouse Input for Tabletop Displays“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. San Jose, California: ACM, S. 647.
- Frett, Eric J. und Barner, Kenneth E. (2005). „Accuracy and Frequency Analysis of Multitouch Interfaces for Individuals with Parkinsonian and Essential Hand Tremor“. In: *Proceedings of the 7th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Assets '05. New York, NY, USA: ACM, S. 60–67.
- Frøkjær, Erik, Hertzum, Morten und Hornbæk, Kasper (2000). „Measuring Usability: Are Effectiveness, Efficiency, and Satisfaction Really Correlated?“ In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '00. New York, NY, USA: ACM, S. 345–352.
- Gajos, Krzysztof Z., Wobbrock, Jacob O. und Weld, Daniel S. (2007). „Automatically generating user interfaces adapted to users' motor and vision capabilities“. In: *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '07*. UIST '07. New York, NY, USA: ACM, S. 231.

- Garcia-Rivera, Javier, Newby, Glynn und Rogge, Matthew (2003). *Mech-A-Sketch*. URL: http://ume.gatech.edu/mechatronics%7B%5C_%7Dlab/Projects/Fall03/Group1/index.html (besucht am 01.01.2015).
- Gillan, Douglas J., Holden, Kritina, Adam, Susan, Rudisill, Marianne und Magee, Laura (1990). „How Does Fitts' Law Fit Pointing and Dragging?“ In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '90. New York, NY, USA: ACM, S. 227–234.
- Goldberg, Ken, Faridani, Siamak und Alterovitz, Ron (2013). *A New Derivation and Dataset for Fitts' Law of Human Motion*. Techn. Ber. UCB/EECS-2013-171. EECS Department, University of California, Berkeley.
- Grossman, Tovi und Balakrishnan, Ravin (2004). „Pointing at Trivariate Targets in 3D Environments“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '04. New York, NY, USA: ACM, S. 447–454.
- Guiard, Yves (1987). „Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: the kinematic chain as a model.“ In: *Journal of motor behavior* 19.4, S. 486–517.
- Guiard, Yves und Beaudouin-Lafon, Michel (2004). „Target Acquisition in Multiscale Electronic Worlds“. In: *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 61.6, S. 875–905.
- Guiard, Yves, Blanch, Renaud und Beaudouin-Lafon, Michel (2004). „Object Pointing: A Complement to Bitmap Pointing in GUIs“. In: *Proceedings of Graphics Interface 2004*. GI '04. School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada: Canadian Human-Computer Communications Society, S. 9–16.
- Guiard, Yves, Olafsdottir, Halla B. und Perrault, Simon T. (2011). „Fitts' law as an explicit time/error trade-off“. In: *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems - CHI '11*, S. 1619.
- Hancock, Mark S. und Booth, Kellogg S. (2004). „Improving Menu Placement Strategies for Pen Input“. In: *Proceedings of Graphics Interface 2004*. GI '04. School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada: Canadian Human-Computer Communications Society, S. 221–230.
- Hancock, Mark S., Carpendale, Sheelagh, Vernier, Frederic D., Wigdor, Daniel und Shen, Chia (2006). „Rotation and Translation Mechanisms for Tabletop Interaction“. In: *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems*. TABLETOP '06. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, S. 79–88.
- Hancock, Mark, Carpendale, Sheelagh und Cockburn, Andy (2007). „Shallow-Depth 3D Interaction - Design and Evaluation of One-, Two- and Three-Touch Techniques“. In: *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. ACM, S. 1147–1156.
- Hancock, Mark, Cate, Thomas ten und Carpendale, Sheelagh (2009). „Sticky Tools: Full 6DOF Force-Based Interaction for Multi-Touch Tables Mark“. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '09. New York, NY, USA: ACM, S. 133.
- Herrlich, Marc, Walther-Franks, Benjamin und Malaka, Rainer (2011). „Integrated Rotation and Translation for 3D Manipulation on Multi-touch Interactive Surfaces“. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Smart Graphics*. SG'11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 146–154.

- Hincapié-Ramos, Juan David, Guo, Xiang, Moghadasian, Paymahn und Irani, Pourang (2014). „Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-air Interactions“. In: *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. New York, NY, USA: ACM, S. 1063–1072.
- Hinckley, Ken, Cutrell, Edward, Bathiche, Steve und Muss, Tim (2002). „Quantitative Analysis of Scrolling Techniques“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '02. New York, NY, USA: ACM, S. 65–72.
- Hinckley, Ken, Sinclair, Mike, Hanson, Erik, Szeliski, Richard und Conway, Matt (1999). „The VideoMouse: A Camera-based Multi-degree-of-freedom Input Device“. In: *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '99. New York, NY, USA: ACM, S. 103–112.
- Hinckley, Ken und Widgor, Daniel (2012). „Input Technologies and Techniques“. In: *Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications, Third Edition*. Hrsg. von Julie A. Jacko. 3rd. Hillsdale, NJ, USA: CRC Press, Inc. Kap. 6, S. 95–132.
- Hodgins, Jessica K., O'Brien, James F. und Bodenheimer, R. E. (1999). „Computer Animation“. In: *The Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Hrsg. von J G Webste. Bd. 3. John Wiley und Sons, S. 686–690.
- Hoffmann, Errol R., Drury, Colin G. und Romanowski, Carol J. (2011). „Performance in one-, two- and three-dimensional terminal aiming tasks.“ In: *Ergonomics* 54.12, S. 1175–85.
- Hoffmann, Errol R. und Sheikh, Ilyas H. (1994). „Effect of varying target height in a Fitts' movement task“. In: *Ergonomics* 37.6, S. 1071–1088.
- Hoggan, Eve, Nacenta, Miguel, Kristensson, Per Ola, Williamson, John, Oulasvirta, Antti und Lehtiö, Anu (2013a). „Multi-touch Pinch Gestures: Performance and Ergonomics“. In: *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '13. New York, NY, USA: ACM, S. 219–222.
- Hoggan, Eve, Williamson, John, Oulasvirta, Antti, Nacenta, Miguel, Kristensson, Per Ola und Lehtiö, Anu (2013b). „Multi-touch Rotation Gestures: Performance and Ergonomics“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 3047–3050.
- Hourcade, Juan Pablo, Bederson, Benjamin B., Druin, Allison und Guimbretière, François (2004). „Differences in Pointing Task Performance Between Preschool Children and Adults Using Mice“. In: *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 11.4, S. 357–386.
- Hughes, John F. et al. (2013). *Computer Graphics: Principles and Practice (3rd Edition)*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, S. 1264.
- Hutchings, Dugald (2012). „An investigation of Fitts' law in a multiple-display environment“. In: *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. New York, New York, USA: ACM Press, S. 3181.
- Hyman, Ray (1953). „Stimulus information as a determinant of reaction time.“ In: *Journal of experimental psychology* 45.3, S. 188–196.
- Igarashi, T., Moscovich, T. und Hughes, J. F. (2005). „Spatial keyframing for performance-driven animation“. In: *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. SCA '05. Los Angeles, California, S. 107–115.

- Ishii, Hiroshi und Ullmer, Brygg (1997). „Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms“. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '97. New York, NY, USA: ACM, S. 234–241.
- Isokoski, Poika (2004). „Performance of Menu-augmented Soft Keyboards“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '04. New York, NY, USA: ACM, S. 423–430.
- Isokoski, Poika, Martin, Benoit, Gandouly, Paul und Stephanov, Thomas (2010). „Motor Efficiency of Text Entry in a Combination of a Soft Keyboard and Unistrokes“. In: *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries*. NordiCHI '10. New York, NY, USA: ACM, S. 683–686.
- Jacob, Robert J. K., Deligiannidis, Leonidas und Morrison, Stephen (1999). „A Software Model and Specification Language for non-WIMP User Interfaces“. In: *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 6.1, S. 1–46.
- Jacob, Robert J. K., Sibert, Linda E., McFarlane, Daniel C. und Mullen Jr., M. Preston (1994). „Integrality and Separability of Input Devices“. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 1.1, S. 3–26.
- John, Bonnie E. und Kieras, David E. (1996). „The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast“. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 3.4, S. 320–351.
- Jota, Ricardo, Ng, Albert, Dietz, Paul und Wigdor, Daniel (2013). „How Fast is Fast Enough?: A Study of the Effects of Latency in Direct-touch Pointing Tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 2291–2300.
- Kabbash, Paul und Buxton, William (1995). „The "Prince" Technique: Fitts' Law and Selection Using Area Cursors“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '95. New York, NY, USA: ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co., S. 273–279.
- Kabbash, Paul, Buxton, William und Sellen, Abigail (1994). „Two-Handed Input in a Compound Task“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '94. New York, NY, USA: ACM, S. 417–423.
- Kaltenbrunner, Martin, Bovermann, Till, Bencina, Ross und Costanza, Enrico (2005). „TUIO - A Protocol for Table Based Tangible User Interfaces“. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation (GW 2005)*. Vannes, France.
- Kieras, David E. (1988). „Towards a practical GOMS model methodology for user interface design“. In: *Handbook of human-computer interaction*. Hrsg. von M Helander. North-Holland: Elsevier Science, S. 135–157.
- Kim, Sunjun, Son, Jeongmin, Lee, Geehyuk, Kim, Hwan und Lee, Woohun (2013). „TapBoard : Making a Touch Screen Keyboard More Touchable“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 553–562.
- Kin, Kenrick, Agrawala, Maneesh und DeRose, Tony (2009). „Determining the Benefits of Direct-touch, Bimanual, and Multifinger Input on a Multitouch Workstation“. In: *Proceedings of Graphics Interface 2009*. GI '09. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, S. 119–124.

- Kin, Kenrick, Hartmann, Björn und Agrawala, Maneesh (2011). „Two-handed Marking Menus for Multitouch Devices“. In: *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 18.3, 16:1–16:23.
- Kipp, Michael (2014). *ANVIL: The Video Annotation Research Tool*. Hrsg. von Jacques Durand, Ulrike Gut und Gjert Kristoffersen.
- Kipp, Michael und Nguyen, Quan (2010). „Multitouch Puppetry : Creating Coordinated 3D Motion for an Articulated Arm“. In: *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS10)*. New York: ACM, S. 147–156.
- Klompaker, Florian, Nebe, Karsten und Fast, Alex (2012). „dSensingNI: A Framework for Advanced Tangible Interaction Using a Depth Camera“. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. TEI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 217–224.
- Kondraske, George V. (1994). „An angular motion Fitt's Law for human performance modeling and prediction“. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE*, 307–308 vol.1.
- Kristensson, Per Ola und Zhai, Shumin (2007). „Command Strokes with and Without Preview: Using Pen Gestures on Keyboard for Command Selection“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. New York, NY, USA: ACM, S. 1137–1146.
- Kruger, Russell, Carpendale, Sheelagh, Scott, Stacey D. und Tang, Anthony (2005). *Fluid integration of rotation and translation*. ACM, S. 601.
- Lander, Jeff (1998). „Making Kine More Flexible“. In: *Game Developer*.
- Langolf, Gary D., Chaffin, Don B. und Foulke, James A. (1976). „An Investigation of Fitts' Law Using a Wide Range of Movement Amplitudes“. In: *Journal of Motor Behavior* 8.2, S. 113–128.
- Lasseter, John (1987). „Principles of traditional animation applied to 3D computer animation“. In: *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Bd. 21. SIGGRAPH '87 4. New York, NY, USA: ACM, S. 35–44.
- Latulipe, Celine (2006). „A symmetric interaction model for bimanual input“. Diss. University of Waterloo.
- Lee, SK., Buxton, William und Smith, Kenneth C. (1985). „A Multi-touch Three Dimensional Touch-sensitive Tablet“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '85. New York, NY, USA: ACM, S. 21–25.
- Leftheriotis, Ioannis und Chorianopoulos, Konstantinos (2011). „User experience quality in multi-touch tasks“. In: *Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems - EICS '11*. Bd. 156. ACM, S. 277.
- Liu, Jun, Pinelle, David, Sallam, Samer, Subramanian, Sriram und Gutwin, Carl (2006). „TNT: Improved Rotation and Translation on Digital Tables“. In: *Proceedings of Graphics Interface 2006*. GI '06. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, S. 25–32.
- Lockwood, Noah und Singh, Karan (2012). „FingerWalking: Motion Editing with Contact-based Hand Performance“. In: *Proceedings of the 11th ACM SIGGRAPH / Eurographics Conference on Computer Animation*. EUROSCA'12. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, S. 43–52.

- Loi, Daria (2013). „Ultrabooks™ and Windows 8: A touchy UX Story“. English. In: *Design, User Experience, and Usability. Web, Mobile, and Product Design SE - 7*. Hrsg. von Aaron Marcus. Bd. 8015. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 57–66.
- Lozano, Cecil, Jindrich, Devin und Kahol, Kanav (2011). „The Impact on Musculoskeletal System During Multitouch Tablet Interactions“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. New York, NY, USA: ACM, S. 825–828.
- Luo, Yuexing und Vogel, Daniel (2014). „Crossing-based Selection with Direct Touch Input“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. New York, NY, USA: ACM, S. 2627–2636.
- MacKenzie, I. Scott (1991). „Fitts' law as a performance model in human-computer interaction“. Diss. Toronto, Ont., Canada, Canada: University of Toronto.
- MacKenzie, I. Scott (1992). „Fitts' Law As a Research and Design Tool in Human-computer Interaction“. In: *Human-Computer Interaction 7.1*, S. 91–139.
- MacKenzie, I. Scott und Buxton, William (1992). „Extending Fitts' law to two-dimensional tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '92*. CHI '92. New York, NY, USA: ACM, S. 219–226.
- MacKenzie, I. Scott und Isokoski, Poika (2008). „Fitts' Throughput and the Speed-accuracy Tradeoff“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '08. New York, NY, USA: ACM, S. 1633–1636.
- MacKenzie, I. Scott und Oniszczak, Aleks (1998). „A Comparison of Three Selection Techniques for Touchpads“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '98. New York, NY, USA: ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co., S. 336–343.
- MacKenzie, I. Scott, Sellen, Abigail und Buxton, William (1991). „A Comparison of Input Devices in Element Pointing and Dragging Tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '91. New York, NY, USA: ACM, S. 161–166.
- MacKenzie, I. Scott und Soukoreff, William R. (2002). „A Model of Two-Thumb Text Entry“. In: *Proceedings of the Graphics Interface*. Hrsg. von Wolfgang Sturzlinger und D. Michael Cool. Canadian Human-Computer Communications Society, S. 117–124.
- MacKenzie, I. Scott und Teather, Robert J. (2012). „FittsTilt: The Application of Fitts' Law to Tilt-based Interaction“. In: *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design*. NordiCHI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 568–577.
- MacKenzie, I. Scott und Zhang, Shawn X. (1999). „The Design and Evaluation of a High-performance Soft Keyboard“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '99. New York, NY, USA: ACM, S. 25–31.
- MacKenzie, I. Scott und Zhang, Shawn X. (2001). „An empirical investigation of the novice experience with soft keyboards“. In: *Behaviour & Information Technology* 20.6, S. 411–418.
- Maestri, George (2006). *Digital Character Animation 3*. Bd. 3. New Riders, S. 320.
- Magnenat-Thalmann, Nadia, Jain, Lakhmi C. und Ichalkaranje, Nikhil, Hrsg. (2008). *New Advances in Virtual Humans: Artificial Intelligence Environment*. Springer-Verlag, S. 176.
- Marentakis, Georgios N. und Brewster, Stephen A. (2006). „Effects of Feedback, Mobility and Index of Difficulty on Deictic Spatial Audio Target Acquisition in the Horizontal

- Plane". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '06. New York, NY, USA: ACM, S. 359–368.
- Martinet, Anthony, Casiez, Géry und Grisoni, Laurent (2010). „The Design and Evaluation of 3D Positioning Techniques for Multi-touch Displays". In: *Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI'10)*. ACM, S. 115–118.
- Matejka, Justin, Grossman, Tovi, Lo, Jessica und Fitzmaurice, George (2009). „The Design and Evaluation of Multi-finger Mouse Emulation Techniques". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. New York, NY, USA: ACM, S. 1073–1082.
- McGuffin, Michael und Balakrishnan, Ravin (2002). „Acquisition of Expanding Targets". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '02. New York, NY, USA: ACM, S. 57–64.
- Micire, Mark, Desai, Munjal, Courtemanche, Amanda, Tsui, Katherine M. und Yanco, Holly A. (2009). „Analysis of Natural Gestures for Controlling Robot Teams on Multi-touch Tabletop Surfaces". In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '09. New York, NY, USA: ACM, S. 41–48.
- Miniotas, Darius, Špakov, Oleg und MacKenzie, I. Scott (2004). „Eye Gaze Interaction with Expanding Targets". In: *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '04. New York, NY, USA: ACM, S. 1255–1258.
- Morris, Meredith Ringel, Brush, a.J. Bernheim und Meyers, Brian R. (2008). „A field study of knowledge workers' use of interactive horizontal displays". In: *2008 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems*, S. 105–112.
- Murugappan, Sundar, Vinayak, Elmqvist, Niklas und Ramani, Karthik (2012). „Extended Multitouch: Recovering Touch Posture and Differentiating Users Using a Depth Camera". In: *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '12. New York, NY, USA: ACM, S. 487–496.
- Natapov, Daniel, Castellucci, Steven J. und MacKenzie, I. Scott (2009). „ISO 9241-9 Evaluation of Video Game Controllers". In: *Proceedings of the Graphics Interface Conference (GI'09)*, S. 223–230.
- Neff, Michael, Albrecht, Irene und Seidel, Hans-Peter (2007). „Layered Performance Animation with Correlation Maps". In: *Computer Graphics Forum* 26, S. 675–684.
- Nguyen, Quan (2009). „Werkzeuge zur IK-basierten Gestenannotation mit Hilfe eines 3D-Skeletts". Mastersthesis. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz.
- Nguyen, Quan und Kipp, Michael (2009). „A Gesture Analysis and Modeling Tool for Interactive Embodied Agents". In: *Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Virtual Agents*. IVA '09. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 566–568.
- Nguyen, Quan und Kipp, Michael (2014). „Orientation matters". In: *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14*. New York, New York, USA: ACM Press, S. 2013–2016.
- Nguyen, Quan und Kipp, Michael (2015). „Where to Start? Exploring the Efficiency of Translation Movements on Multitouch Devices". In: *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. Hrsg. von Julio Abascal, Simone Barbosa, Mirko Fetter, Tom Gross, Philippe Palanque und Marco Winckler. Bd. 9299. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, S. 173–191.

- Ni, Tao, Bowman, Doug A., North, Chris und McMahan, Ryan P. (2011). „Design and evaluation of freehand menu selection interfaces using tilt and pinch gestures“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 69.9, S. 551–562.
- Nielsen, Jakob und Levy, Jonathan (1994). „Measuring usability: preference vs. performance“. In: *Communications of the ACM* 37.4, S. 66–75.
- Norman, Don (2004). *Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things*. 1. Aufl. Bd. 27. 2. Basic Books, S. 234–234.
- Olafsdottir, Halla B., Tsandilas, Theophanis und Appert, Caroline (2014). „Prospective Motor Control on Tabletops: Planning Grasp for Multitouch Interaction“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. New York, NY, USA: ACM, S. 2893–2902.
- Olwal, Alex, Feiner, Steven und Heyman, Susanna (2008). „Rubbing and tapping for precise and rapid selection on touch-screen displays“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Bd. 2008. CHI '08. New York, New York, USA: ACM Press, S. 295–304.
- Oore, Sageev, Terzopoulos, Demetri und Hinton, Geoffrey (2002). „A desktop input device and interface for interactive 3d character animation“. In: *Graphics Interface*, S. 133–140.
- Oulasvirta, Antti et al. (2013). „Improving Two-thumb Text Entry on Touchscreen Devices“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 2765–2774.
- Parent, Rick (2001). *Computer Animation: Algorithms and Techniques*. Morgan Kaufmann.
- Pastel, Robert (2006). „Measuring the Difficulty of Steering Through Corners“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '06. New York, NY, USA: ACM, S. 1087–1096.
- Pedersen, Esben Warming und Hornbæk, Kasper (2012). „An Experimental Comparison of Touch Interaction on Vertical and Horizontal Surfaces“. In: *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design*. NordiCHI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 370–379.
- Po, Barry A., Fisher, Brian D. und Booth, Kellogg S. (2004). „Mouse and Touchscreen Selection in the Upper and Lower Visual Fields“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '04. New York, NY, USA: ACM, S. 359–366.
- Pospeschill, Markus (2006). *Statistische Methoden*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Quinn, Jeffrey M. und Tran, Tuan Q. (2010). „Attractive phones don't have to work better“. In: *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10*. New York, New York, USA: ACM Press, S. 353.
- Reisman, John L., Davidson, Philip L. und Han, Jefferson Y. (2009). „A screen-space formulation for 2D and 3D direct manipulation“. In: *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, S. 69–78.
- Rick, Jochen (2010). „Performance Optimizations of Virtual Keyboards for Stroke-based Text Entry on a Touch-based Tabletop“. In: *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '10. New York, NY, USA: ACM, S. 77–86.
- Rogers, Yvonne und Lindley, Siân (2004). „Collaborating around vertical and horizontal large interactive displays: which way is best?“ In: *Interacting with Computers* 16.6, S. 1133–1152.

- Rosenbaum, David A., Slotta, James D., Vaughan, Jonathan und Plamondon, Réjean (1991). „Optimal Movement Selection“. In: *Psychological Science* 2.2, S. 86–91.
- Sasangohar, Farzan, MacKenzie, I. Scott und Scott, Stacey D. (2009). „Evaluation of Mouse and Touch Input for a Tabletop Display Using Fitts' Reciprocal Tapping Task“. In: *Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society – HFES 2009*. Santa Monica: Human Factors und Ergonomics Society, S. 839–843.
- Schmidt, Dominik, Block, Florian und Gellersen, Hans (2009). „A Comparison of Direct and Indirect Multi-touch Input for Large Surfaces“. In: *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction: Part I. INTERACT '09*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 582–594.
- Sears, Andrew und Shneiderman, Ben (1991). „High precision touchscreens: design strategies and comparisons with a mouse“. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 34.4, S. 593–613.
- Seow, Steven C. (2005). „Information Theoretic Models of HCI: A Comparison of the Hick-Hyman Law and Fitts' Law“. In: *Human-Computer Interaction* 20.3, S. 315–352.
- Shannon, Claude E. (1948). „A Mathematical Theory of Communication“. In: *The Bell System Technical Journal* 27, S. 379–423, 623–656.
- Shannon, Claude E. und Weaver, Warren (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.
- Shneiderman, Ben (1982). „The future of interactive systems and the emergence of direct manipulation“. In: *Behaviour & Information Technology* 1.3, S. 237–256.
- Shneiderman, Ben (1983). „Direct Manipulation: A Step Beyond Programming Languages“. In: *Computer* 16.8, S. 57–69.
- Shneiderman, Ben und Plaisant, Catherine (2004). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction (4th Edition)*. 4th. Pearson Addison Wesley.
- Smits-Engelsman, B. C. M., Van Galen, G. P. und Duysens, J. (2002). „The breakdown of Fitts' law in rapid, reciprocal aiming movements“. In: *Experimental Brain Research* 145.2, S. 222–230.
- Son, Jeongmin und Lee, Geehyuk (2013). „FingerSkate: Making Multi-touch Operations Less Constrained and More Continuous“. In: *Proceedings of the Adjunct Publication of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. UIST '13 Adjunct*. New York, NY, USA: ACM, S. 107–108.
- Sonderegger, Andreas, Uebelbacher, Andreas, Pugliese, Manuela und Sauer, Juergen (2014). „The Influence of Aesthetics in Usability Testing: The Case of Dual-domain Products“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '14*. New York, NY, USA: ACM, S. 21–30.
- Soukoreff, William R. und MacKenzie, I. Scott (1995). „Theoretical upper and lower bounds on typing speed using a stylus and a soft keyboard“. In: *Behaviour & Information Technology* 14.6, S. 370–379.
- Soukoreff, William R. und MacKenzie, I. Scott (2004). „Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 61.6, S. 751–789.
- Soukoreff, William R., Zhao, Jian und Ren, Xiangshi (2011). „The Entropy of a Rapid Aimed Movement: Fitts' Index of Difficulty versus Shannon's Entropy“. In: *Human-Computer Interaction – INTERACT 2011*. Hrsg. von Pedro Campos, Nicholas Graham, Joaquim

- Jorge, Nuno Nunes, Philippe Palanque und Marco Winckler. Bd. 6949. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 222–239.
- Spindler, Martin, Schuessler, Martin, Martsch, Marcel und Dachsel, Raimund (2014). „Pinch-drag-flick vs. Spatial Input: Rethinking Zoom & Pan on Mobile Displays“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. New York, NY, USA: ACM, S. 1113–1122.
- Stoelen, Martin F. und Akin, David L. (2010). „Assessment of Fitts' Law for Quantifying Combined Rotational and Translational Movements“. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 52.1, S. 63–77.
- Sturman, David Joel (1992). „Whole-hand Input“. Diss. Massachusetts Institute of Technology.
- Teather, Robert J. und Stuerzlinger, Wolfgang (2013). „Pointing at 3D Target Projections with One-eyed and Stereo Cursors“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA: ACM, S. 159–168.
- Thomas, Frank und Johnston, Ollie (1995). *The Illusion of Life: Disney Animation*, S. 576.
- Tolani, Deepak, Goswami, Ambarish und Badler, Norman I. (2000). „Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs“. In: *Graph. Models Image Process.* Hrsg. von Deepak Tolani, Ambarish Goswami und Norman I Badler. Bd. 62. 5. Orlando, FL, USA: Academic Press, Inc., S. 353–388.
- Tractinsky, N., Katz, a. S. und Ikar, D. (2000). „What is beautiful is usable“. In: *Interacting with Computers* 13.2, S. 127–145.
- Tubb, Robert und Dixon, Simon (2015). „An Evaluation of Multidimensional Controllers for Sound Design Tasks“. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. New York, NY, USA: ACM, S. 47–56.
- Tuch, Alexandre N., Roth, Sandra P., Hornbæk, Kasper, Opwis, Klaus und Bargas-Avila, Javier A. (2012). „Is beautiful really usable? Toward understanding the relation between usability, aesthetics, and affect in HCI“. In: *Computers in Human Behavior* 28.5, S. 1596–1607.
- Tullis, Thomas und Albert, William (2008). *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Veit, Manuel, Capobianco, Antonio und Bechmann, Dominique (2009). „Influence of Degrees of Freedom's Manipulation on Performances During Orientation Tasks in Virtual Reality Environments“. In: *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '09. New York, NY, USA: ACM, S. 51–58.
- Vertegaal, Roel (2008). „A Fitts Law Comparison of Eye Tracking and Manual Input in the Selection of Visual Targets“. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Multimodal Interfaces*. ICMI '08. New York, NY, USA: ACM, S. 241–248.
- Vogel, Daniel und Casiez, Géry (2012). „Hand Occlusion on a Multi-touch Tabletop“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 2307–2316.
- Walther-Franks, Benjamin und Malaka, Rainer (2014). „An interaction approach to computer animation“. In: *Entertainment Computing* 5.4, S. 271–283.
- Walther-Franks, Benjamin et al. (2012). „Dragimation: Direct Manipulation Keyframe Timing for Performance-based Animation“. In: *Proceedings of Graphics Interface 2012*. GI '12. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, S. 101–108.

- Wang, Guangyu, McGuffin, Michael J., Bérard, François und Cooperstock, Jeremy R. (2011). „Pop-up Depth Views for Improving 3D Target Acquisition“. In: *Proceedings of Graphics Interface 2011*. GI '11. School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada: Canadian Human-Computer Communications Society, S. 41–48.
- Wang, Yanqing, MacKenzie, Christine L., Summers, Valerie A. und Booth, Kellogg S. (1998). „The Structure of Object Transportation and Orientation in Human-computer Interaction“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '98. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., S. 312–319.
- Ware, Colin und Mikaelian, Harutune H. (1987). „An Evaluation of an Eye Tracker As a Device for Computer Input“. In: *Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*. CHI '87. New York, NY, USA: ACM, S. 183–188.
- Watson, Diane, Hancock, Mark, Mandryk, Regan L. und Birk, Max (2013). „Deconstructing the touch experience“. In: *Proceedings of the 2013 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces - ITS '13*. New York, New York, USA: ACM Press, S. 199–208.
- Weiss, Malte, Voelker, Simon, Sutter, Christine und Borchers, Jan (2010). „BendDesk: Dragging Across the Curve“. In: *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '10. New York, NY, USA: ACM, S. 1–10.
- Weiss, Malte et al. (2009). „SLAP Widgets: Bridging the Gap Between Virtual and Physical Controls on Tabletops“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. New York, NY, USA: ACM, S. 481–490.
- Welman, Chris (1993). „Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation“. Diss. Simon Fraser University, S. 77.
- Wigdor, Daniel, Shen, Chia, Forlines, Clifton und Balakrishnan, Ravin (2006). „Effects of Display Position and Control Space Orientation on User Preference and Performance“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '06. New York, NY, USA: ACM, S. 309–318.
- Wigdor, Daniel und Wixon, Dennis (2011). *Brave NUI World: Designing Natural User Interfaces for Touch and Gesture*. 1st. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., S. 253.
- Wimmer, Raphael, Hennecke, Fabian, Schulz, Florian, Boring, Sebastian, Butz, Andreas und Hußmann, Heinrich (2010). „Curve: Revisiting the Digital Desk“. In: *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries*. NordiCHI '10. New York, NY, USA: ACM, S. 561–570.
- Withana, Anusha, Kondo, Makoto, Kakehi, Gota, Makino, Yasutoshi, Sugimoto, Maki und Inami, Masahiko (2010). „ImpAct: Enabling Direct Touch and Manipulation for Surface Computing“. In: *Adjunct Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '10. New York, NY, USA: ACM, S. 411–412.
- Wobbrock, Jacob O., Cutrell, Edward, Harada, Susumu und MacKenzie, I. Scott (2008a). „An Error Model for Pointing Based on Fitts' Law“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '08. ACM, S. 1613–1622.
- Wobbrock, Jacob O. und Gajos, Krzysztof Z. (2007). „A Comparison of Area Pointing and Goal Crossing for People with and Without Motor Impairments“. In: *Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Assets '07. New York, NY, USA: ACM, S. 3–10.

- Wobbrock, Jacob O., Morris, Meredith Ringel und Wilson, Andrew D. (2009). „User-Defined Gestures for Surface Computing“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. New York, NY, USA: ACM, S. 1083–1092.
- Wobbrock, Jacob O., Myers, Brad a. und Aung, Htet Htet (2008b). „The performance of hand postures in front- and back-of-device interaction for mobile computing“. In: *International Journal of Human Computer Studies* 66.12, S. 857–875.
- Wobbrock, Jacob O., Shinohara, Kristen und Jansen, Alex (2011). „The Effects of Task Dimensionality, Endpoint Deviation, Throughput Calculation, and Experiment Design on Pointing Measures and Models“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. New York, NY, USA: ACM, S. 1639–1648.
- Wu, M., Chia Shen, Ryall, K., Forlines, C. und Balakrishnan, R. (2006). „Gesture Registration, Relaxation, and Reuse for Multi-Point Direct-Touch Surfaces“. In: *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems*. Bd. 2006. TABLETOP '06, S. 185–192.
- Wu, Mike und Balakrishnan, Ravin (2003). „Multi-finger and whole hand gestural interaction techniques for multi-user tabletop displays“. In: *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Bd. 5. UIST '03 2. New York, New York, USA: ACM Press, pages 193–202.
- Yang, N. F., Jin, D. W., Zhang, M., Huang, C. H. und Wang, R. C. (2001). „An extending Fitts' Law for human upper limb performance evaluation“. In: *Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Bd. 2. IEEE Computer Society, S. 1240–1243.
- Zhai, Shumin (2004). „Characterizing computer input with Fitts' law parameters—the information and non-information aspects of pointing“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 61.6, S. 791–809.
- Zhai, Shumin, Hunter, Michael und Smith, Barton A. (2000). „The Metropolis Keyboard - an Exploration of Quantitative Techniques for Virtual Keyboard Design“. In: *Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '00. New York, NY, USA: ACM, S. 119–128.
- Zhai, Shumin, Kong, Jing und Ren, Xiangshi (2004). „Speed–accuracy tradeoff in Fitts' law tasks—on the equivalency of actual and nominal pointing precision“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 61.6, S. 823–856.
- Zhai, Shumin und Kristensson, Per Ola (2012). „The word-gesture keyboard“. In: *Communications of the ACM* 55.9, S. 91.
- Zhai, Shumin und Milgram, Paul (1998). „Quantifying Coordination in Multiple DOF Movement and Its Application to Evaluating 6 DOF Input Devices“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Los Angeles: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., S. 320–327.
- Zhai, Shumin, Milgram, Paul und Buxton, William (1996). „The influence of muscle groups on performance of multiple degree-of-freedom input“. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: common ground*. ACM, S. 308–315.
- Zhai, Shumin, Sue, Alison und Accot, Johnny (2002). „Movement Model, Hits Distribution and Learning in Virtual Keyboarding“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '02. New York, NY, USA: ACM, S. 17–24.

- Zhang, Xinyong, Zha, Hongbin und Feng, Wenxin (2012). „Extending Fitts’ Law to Account for the Effects of Movement Direction on 2D Pointing“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. New York, NY, USA: ACM, S. 3185–3194.
- Zhang, Xuan und MacKenzie, I. Scott (2007). „Evaluating Eye Tracking with ISO 9241 - Part 9“. In: *Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments*. Hrsg. von Julie A. Jacko. Bd. 4552. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 779–788.
- Zhao, Jian, Soukoreff, William R. und Balakrishnan, Ravin (2015). „Exploring and modeling unimanual object manipulation on multi-touch displays“. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 78, S. 68–80.

Abbildungsverzeichnis

1.1. (Multi-)Touch-Geräte im Alltag	2
1.2. PDA-Eingabe per Sift (Stylus)	2
1.3. Occlusion und Fat-Finger bei Multitouch-Eingaben	3
1.4. Skelettbasierte Gestenannotation	5
1.5. Gulf of Competence	8
2.1. Etch-A-Sketch Maltafel als Eingabegerät	20
2.2. Kommunikationssystem nach Shannon	22
2.3. Fitts Originalversuche	26
2.4. Die Ergebnisse aus Aufgabe 1. W_s ist die Breite der Zielplatten in inch. A die Distanz zwischen den Mittelpunkten der beiden Platten. t ist die Durchschnittszeit in Sekunden, die benötigt wurde, um zwischen den beiden Platten zu wechseln. I_p ist der berechnete Index of Performance (Fitts, 1954).	27
2.5. Die in dieser Arbeit verwendeten Messzeitpunkte	31
2.6. Approximation der Fehlerrate	33
2.7. 3D-Aufteilung des verwendeten rechtshändigen Koordinatensystems	34
2.8. Kinematische Kette mit entsprechender hierarchischer Struktur	36
2.9. Beispiele für verschiedene Endposen bei der <i>Inverse Kinematic</i>	37
3.1. John und Kieras (1996): Beispielanalyse mit CMN-GOMS	41
3.2. John und Kieras (1996): Beispielanalyse mit KLM	42
3.3. John und Kieras (1996): Beispielanalyse mit NGOMSL	43
3.4. Accot und Zhai (1997): Untersuchte Pfade und Beispielanwendung von Steering Gesetz	44
3.5. Crossman und Goodeve (1983): Bewegungsanalyse und Setup	45
3.6. Stoelen und Akin (2010): Visuelle Darstellung der Aufgaben und Versuchsaufbau	47
3.7. Stoelen und Akin (2010): Zusammenfassung der Durchschnittszeiten für Translation und Rotation	48
3.8. Zhao et al. (2015): Visuelle Darstellung der Versuchsaufgabe	49
3.9. Hancock et al. (2006): Schematische Illustration von Translation	51
3.10. Hancock et al. (2006): Schematische Illustration von Independent Rotation & Translation (Hancock et al., 2006)	52
3.11. Hancock et al. (2006): Schematische Illustration von <i>Automatic Orientation</i>	52
3.12. Forlines et al. (2005): Methoden zur automatischen Orientierung von Dokumenten	53

3.13. Hancock et al. (2006) und Kruger et al. (2005): Schematische Illustration von <i>RNT</i>	54
3.14. Hancock et al. (2006): Schematische Illustration von Two-Point Rotation & Translation (2-Punkt-RT)	54
3.15. Kin et al. (2011): Bimanuales Gestenmenü auf einem iPod	55
3.16. Benko und Feiner (2007): Ballonmetapher	56
3.17. Hancock et al. (2007) und Kruger et al. (2005): <i>Matching</i> - und <i>Docking</i> -Aufgabe	58
3.18. Weiss et al. (2009): SLAP (Silicone iLluminated Active Peripherals) Widgets .	60
3.19. Hancock und Booth (2004): Unterteilung eines Touch-Display in vier Zonen .	62
3.20. Hoggan et al. (2013a,b): Einteilung der Zonen zur Untersuchung von Rotation und Pinch-Geste	62
3.21. Wobbrock et al. (2009): Beispiele für selbstdefinierte Gesten von Versuchspersonen	63
3.22. Wang et al. (1998): Versuchsaufbau	64
3.23. Olafsdottir et al. (2014): Ablauf eines Trials	65
3.24. Matejka et al. (2009): Handposen zur Emulierung einer Maus auf einem Multitouch-Display	66
3.25. Wimmer et al. (2010): Prototyp Curve	67
3.26. Weiss et al. (2010): BendDesk	67
3.27. Weiss et al. (2010): Versuchsbedingungen	68
3.28. Bi et al. (2011): Versuchsaufbau und Ergebnisse	69
3.29. Watson et al. (2013): Screenshots vom Spiel der Evaluation	69
3.30. Jacob et al. (1994): Integral und City-Block Bewegungen	71
3.31. Zhai und Milgram, 1998: Beispielanwendung des Koordinationsmaßes	72
3.32. (Stoelen und Akin, 2010): Unkoordinierte und koordinierte Ausführung	73
3.33. Rosenbaum et al. (1991): Ergebnistabelle der verwendeten kinematischen Ketten	75
3.34. Zhai et al. (1996): Aufgabe und Eingabegeräte	75
3.35. Balakrishnan und MacKenzie (1997): Performanz der einzelnen kinematischen Ketten	76
3.36. Hincapié-Ramos et al. (2014): Konfigurationen der Studie	77
3.37. Hincapié-Ramos et al. (2014): Heatmap und korrespondierende SEATO-Tastatur	78
3.38. Bachynskyi et al. (2015): Übersicht über Beanspruchung der Muskulatur über Displays-Größen	79
3.39. Dontcheva et al. (2003): Animationsbeispiel	81
3.40. (Oore et al., 2002): Interface mit Bambusstöcken	81
3.41. Igarashi et al. (2005): Spatial keyframe Animation	82
3.42. Neff et al. (2007): Animation mit <i>Correlation Map</i>	82
3.43. Walther-Franks et al. (2012): Animation mit Dragimation	83
3.44. Lockwood und Singh (2012): Laufanimation mit <i>FingerWalk</i>	84
3.45. Achibet et al. (2015): <i>THING</i> -Interface	85
4.1. Multitouch-Interface	88
4.2. Aufgabe 1 Posenerstellung	90
4.3. Aufgabe 2 Pfadverfolgung	91
4.4. Maßnahmen zur Verbesserung der Lesbarkeit von 3D-Szenen	93

4.5. Die vier Zonen der Benutzeroberfläche	94
4.6. Die Steuerung des 3D-Arms beim ersten Interface-Prototyp mit drei Fingern	96
4.7. Logikdiagramm der Armkontrolle	97
4.8. Darstellung der 2-Punkt-RT-Technik	98
4.9. Logikdiagramm der Handsteuerung	98
4.10. Morph-Map mit den Handformen und Schematische Darstellung der Interpolationsfunktion sowie interpolierte Handform	99
4.11. Logikdiagramm der Maussteuerung	100
4.12. Beispiele für die Koordination von Bewegungen	103
4.13. Aufgabenplanung	104
4.14. Durchschnittliche Ausführungszeiten für Aufgabe 1 und 2	106
4.15. Auswertung der Koordination	107
4.16. Ausschnitt einer Animation aus der Kreativ-Aufgabe	108
5.1. Screenshot der Translationsaufgabe	119
5.2. Screenshot der Rotationsaufgabe	120
5.3. Screenshot der Skalierungsaufgabe	120
5.4. Screenshot der kombinierten Aufgabe: Rotation-Skalierung-Translation (RST)	121
5.5. Versuchsaufbau mit dem Multitouch-Display in der verwendeten Neigung	122
5.6. Versuchsauswertung	125
5.7. Regressionsgeraden von Translation, Skalierung, Rotation und RST	127
5.8. Rotation über Schieberegler	130
6.1. Erwartete Strategien zur Lösung der Aufgaben.	135
6.2. Die vier Bewegungskategorien	136
6.3. Feedbackvarianten an die Versuchspersonen nach einem Trial	139
6.4. Durchschnittszeiten der Bewegungskategorien	140
6.5. Durchschnittszeiten der Reaktionszeit	141
6.6. Interaktionsplot	141
6.7. Regressionsanalyse	142
6.8. Beispielpfade der identifizierten Strategien	144
6.9. Die Verteilung der Strategiewechsel auf die Bewegungskategorien	145
7.1. Ablauf eines Trial	154
7.2. Distanzen, Winkel und Startpunkte	155
7.3. Bewegungsrichtungen der Startpunkte	156
7.4. Kamera-Setup	158
7.5. Anzeige der letzten Ausführungszeit	159
7.6. Monitoransicht der Versuchsleitung. Die Versuchsleitung beobachtete die Versuchspersonen während der Untersuchung aus drei unterschiedlichen Perspektiven.	160
7.7. Funktionale Einteilung des Multitouch-Display	161
7.8. Statistische Verteilung von Ausführungszeit und Throughput	162
7.9. Throughput-Vergleich (TP) bei horizontal und vertikal geneigtem Multitouch-Display	162
7.10. Vergleich der Performanz der unterschiedlichen Bewegungsrichtungen	163

7.11. Bewegungsachsen	164
7.12. Vergleich der Performanz für Bewegungsachsen	165
7.13. Vergleich des angepassten mit dem ursprünglichen Fitts-Modell	168
7.14. Videoanalyse mit ANVIL	169
7.15. Optimierungsvorschläge aktueller Benutzeroberflächen	177
7.16. Beispiel für eine automatisierte Designbewertung	179
7.17. Vergleich <i>Bent arm position</i> und kinematische Kette	180
7.18. Ausweichverhalten bzw. Anpassung der Handorientierung	181
7.19. Unterschiedliche Handorientierung bei der Arbeit mit einem Multitouch- Display	182

Tabellenverzeichnis

3.1. Stoelen und Akin (2010): Werte der Regressionsanalyse	47
3.2. Hancock et al. (2006): Vergleich der einzelnen Methoden bezüglich der dazu- gehörigen Ein- und Ausgabeparameter	51
3.3. Hancock et al. (2006): Vergleich der Freiheitsgrade für Ein- und Ausgabe jeder Methode	54
4.1. Signifikante Ergebnisse der Fragebögen	109
5.1. Verwendete Kombinationen für Translation, Rotation und Skalierung	122
5.2. Verwendete Werte für die Konfigurationen für RST	123
5.3. Permutierte Zusammenstellung der Konfigurationsdateien	123
5.4. Ergebnisse nach Bereinigung der Durchführungszeiten	126
5.5. Abweichungen der Effizienz	127
5.6. Abweichungen der Performanz	127
6.1. Konfigurationen für Translation und Rotation	137
6.2. Prozentuale Verteilung der Strategien auf die Bewegungskategorien	144
7.1. Vergleich der Performanz für Ecken	166
7.2. Vergleich der Performanz für Randzonen	167
7.3. Prozentuale Verteilung der kinematischen Ketten auf die Distanzen	170
7.4. Vergleich des horizontal und vertikal geneigten Multitouch-Display im Urteil der Versuchspersonen	170
7.5. Deskriptive und statistische Auswertung der fünf Fragen aus Fragebogen Teil 2171	

Abkürzungsverzeichnis

ID Index of Difficulty

T Translation

R Rotation

S Skalierung

RST Rotation-Skalierung-Translation

ANHANG **A** 

Koordinierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden

Fragebogen:

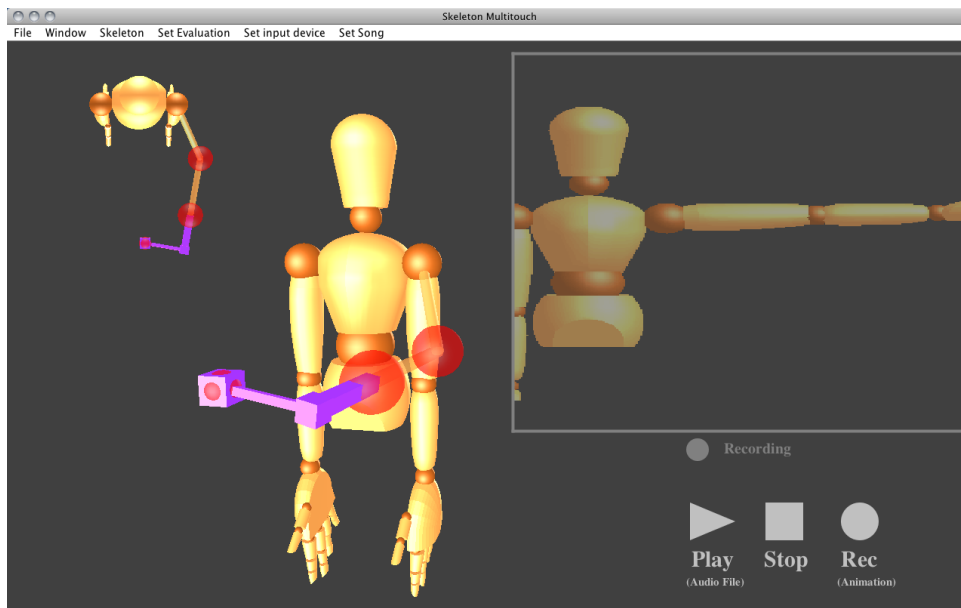
- VP-Nummer
- Alter
- Geschlecht
- Beruf/Studienfach
- Rechts/Linkshänder/in:
 - rechts
 - links
- Haben Sie Probleme beim Sehen von 3D-Effekten: (kreuzen Sie bitte eine der folgenden 5 Optionen an)
 - ja sehr
 - etwas
 - mittel
 - wenig
 - nein, gar nicht
- Haben Sie bereits Multitouch benutzt (iPhone, neues MacBook)
 - nein
 - gelegentlich
 - häufig

Instruktionen

(1) Allgemein

Willkommen bei unserem Experiment. Vielen Dank, dass Sie hier mitmachen!

Bei diesem Experiment geht es darum, einen menschlichen Arm im 3D-Raum zu bewegen bzw. zu positionieren.



Es stehen Ihnen dazu zwei Eingabegeräte zur Verfügung: Maus **oder** Multitouch. Die Bedienung der Geräte wird Ihnen zu gegebener Zeit ausführlich erklärt.

Dieses Experiment besteht aus drei Teilen. Zu jedem Experiment gibt es vorab noch Detailinformationen. Viel Spaß!

(2) Aufgabe 1

Hier geht es darum, eine jeweils angezeigte Zielpose möglichst schnell zu erreichen. Beachten Sie dabei:

- Lassen Sie sich zwischen den Posen genug Zeit, um die Zielpose zu „verstehen“
- Beginnen Sie mit der Bedienung des Arms erst dann, wenn Sie für die Positionierung bereit sind
- Versuchen Sie, die Zielposition so schnell wie möglich zu erreichen.

(3) Aufgabe 2

In diesem Experiment geht es darum, den Arm entlang einer vorgegebenen Spur zu bewegen. Die Spur besteht aus einer Reihe von „Ballons“: bewegen Sie die Hand nacheinander durch diese Ballons hindurch. Bereits berührte Ballons verschwinden.

Ist eine Spur erfolgreich „abgearbeitet“, erscheint eine neue. Schauen Sie sich die neue Spur erst einmal an. Beginnen Sie dann, indem Sie einen Finger aufsetzen oder die Maustaste drücken.

Die Stellung des Ellbogens spielt in diesem Experiment keine Rolle.

(1) Aufgabe 3

Jetzt möchten wir, dass Sie die Multitouch-Methode verwenden, um ein Musikstück mit Bewegung zu begleiten. Dazu hören Sie zunächst einen Musikausschnitt und können gleichzeitig schon Bewegungen ausprobieren. In einem zweiten Durchlauf werden Ihre Bewegungen aufgezeichnet: versuchen Sie hier, durchgehend passende Bewegungen zu erzeugen.

Neu an dieser Aufgabe ist die Möglichkeit, die Handform zu verändern (offene Hand, Faust, ausgestreckter Zeigefinger etc.). Damit können Sie Ihrer „Choreographie“ mehr Ausdruck bzw. „Stil“ verleihen.

Sie haben gleich einige Minuten um sich mit dem Interface vertraut zu machen.

Sie erhalten jeweils zwei Lieder, die Sie interpretieren sollen.

Fragebogen

Fragebogen Aufgabe 1:

Bitte geben Sie bei diesen Fragen an, welches Eingabegerät (Maus oder Multitouch) Sie bevorzugen. Zum Beispiel:

Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
 |
 |
 beide gleich

	Welches der Eingabegeräte ...	
1	... war nützlicher?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
2	... hat genau das getan, was ich erwartete?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
3	... erleichterte mir das Lösen der Aufgabe?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
4	... ermöglichte ein schnelleres Lösen der Aufgabe?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
5	... war einfacher zu handhaben?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
6	... benötigte den wenigsten Aufwand um die Aufgabe zu lösen?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
7	... war müheloser zu bedienen?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
8	... ermöglichte ein besseres Korrigieren von Fehlern?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
9	... war <i>leichter</i> zu erlernen?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
10	... war <i>schneller</i> zu erlernen?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
11	Welche Bedienweise konnten Sie sich leichter merken?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
12	... ermöglichte nach kurzer Zeit einen sicheren Umgang.	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
13	Mit welchem Gerät waren Sie zufriedener?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
14	Welches Gerät würden Sie für diese Aufgabe empfehlen?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch
15	Welche Gerät machte mehr Spaß?	Maus ○ ○ ○ ○ ○ Multitouch

	Welches der Eingabegeräte ...	
16	Welches Gerät finden Sie besser?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch

Fragebogen

Fragebogen Aufgabe 2:

Bitte geben Sie bei diesen Fragen an, welches Eingabegerät (Maus oder Multitouch) Sie bevorzugen. Zum Beispiel:

Maus Multitouch
 |
 beide gleich

	Welches der Eingabegeräte ...	
1	... war nützlicher?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
2	... hat genau das getan, was ich erwartete?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
3	... erleichterte mir das Lösen der Aufgabe?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
4	... ermöglichte ein schnelleres Lösen der Aufgabe?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
5	... war einfacher zu handhaben?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
6	... benötigte den wenigsten Aufwand um die Aufgabe zu lösen?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
7	... war müheloser zu bedienen?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
8	... ermöglichte ein besseres Korrigieren von Fehlern?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
9	... war <i>leichter</i> zu erlernen?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
10	... war <i>schneller</i> zu erlernen?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
11	Welche Bedienweise konnten Sie sich leichter merken?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
12	... ermöglichte nach kurzer Zeit einen sicheren Umgang.	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
13	Mit welchem Gerät waren Sie zufriedener?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch

A. Koordinierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden

	Welches der Eingabegeräte ...	
14	Welches Gerät würden Sie für diese Aufgabe empfehlen?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
15	Welche Gerät machte mehr Spaß?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch
16	Welches Gerät finden Sie besser?	Maus <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Multitouch

Anmerkungen:

Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe3

A. Koordinierte Steuerung von mehreren Freiheitsgraden

Fragebogen Aufgabe 3:

Skala von 1 bis 5 mit Beschriftung. „Ich war mit... zufrieden.“

	„Ich war mit... zufrieden.“
Sind Sie mit der Handhabung des Multitouch bei dieser Aufgabe zufrieden?	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu
Sind Sie mit dem erzielten Ergebnis zufrieden?	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu
Sind Sie mit der direkten Umsetzung der Bewegung zufrieden?	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu
Entsprachen die ausgeführten Bewegungen Ihren Erwartungen?	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu
Ich muss es haben	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu
Es war angenehm zu benutzen	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu
Es ist großartig!	trifft gar nicht zu <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> trifft zu

1. Wie würdest Du das Gefühl beim ersten Kontakt mit dem Multitouch beschreiben?
2. Hat sich dies im Laufe der Versuchsreihen geändert?
3. Mit welchem Gerät hast Du Dich am Anfang wohler gefühlt?
4. Mit welchem Gerät fühlst Du Dich jetzt nach 6 Sessions wohler?
5. Für welches Gerät würdest Du Dich jetzt entscheiden, um die jeweiligen Aufgaben zu lösen?
6. Für welches Gerät hättest Du Dich bei der ersten Sitzung entschieden, um die jeweiligen Aufgaben zu lösen?
7. Wie würdest Du Deinen Lerneffekt mit dem Multitouch beschreiben?
8. Macht die Arbeit mit dem Multitouch Spaß?
9. Hat sich der „Spaßfaktor“ im Laufe der Sitzungen verändert?
 - 9.1. Wenn ja, inwiefern?
10. Bei welcher „Kreativaufgabe“ hat das Multitouch am meisten Sinn gemacht und warum?

ANHANG **B** 

**Vergleich von Translation und
Rotation**



Fragebogen - Multitouch-Studie Juli/August 2012

VP-Nummer:

- ▶ Alter: _____
- ▶ Geschlecht:
 - männlich
 - weiblich
- ▶ Beruf/Studienfach: _____
- ▶ Händigkeit:
 - Rechtshänder
 - Linkshänder
- ▶ Haben Sie bereits Erfahrungen mit Single- bzw. Multitouch-Geräten gemacht(z.B. Smartphone, Tablet PC, neues MacBook etc.)?
 - ja
 - nein
- ▶ Wenn ja, wie häufig benutzen Sie ein solches Gerät?
 - nie
 - selten
 - gelegentlich
 - oft
 - sehr oft

B. Vergleich von Translation und Rotation

1. Wie schwer waren die Aufgaben?
 - sehr leicht
 - leicht
 - schwer
 - sehr schwer
2. Hat sich diese Einschätzung im Laufe der Versuchsreihen geändert?
 - ja
 - nein
3. Wenn ja in welche Richtung?
 - eher schwerer
 - eher leichter
4. Wie würden Sie Ihren Lerneffekt bei den Aufgaben beschreiben?

5. Macht Ihnen die Arbeit mit dem Multitouch Spaß?
 - ja
 - nein
6. Hat sich der „Spaßfaktor“ im Laufe der Sitzungen verändert?
 - ja
 - nein
7. Wenn ja, inwiefern?

8. Hatten Sie bei irgendeiner Aufgabe Probleme?

8. Ist Ihnen etwas bei den einzelnen Aufgaben aufgefallen?

9. Haben Sie sonstige Verbesserungsvorschläge für das Experiment?

10. Fandest Du die Aufgaben anstrengend?

- kaum
- wenig
- etwas
- sehr

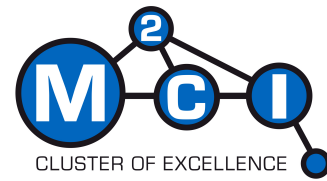
11. Wie würdest Du die Aufgaben nach Anstrengung und Müdigkeit sortieren (Höchste zuerst)

T=Translation, **R**=Rotation, **S**=Skalierung, **RST**=Rotation-Skalierung-Translation

Reihenfolge	Anstrengung	Müdigkeit
1. (höchste)		
2.		
3.		
4. (niedrigste)		

ANHANG **C** 

**Schwierigkeit und Effizienz von
Rotation und Translation**



Fragebogen - Multitouch-Studie Juli/August 2012 (RT)

VP-Nummer:

- ▶ Alter: _____
- ▶ Geschlecht:
 - männlich
 - weiblich
- ▶ Beruf/Studienfach: _____
- ▶ Händigkeit:
 - rechts
 - links
- ▶ Haben Sie bereits Erfahrungen mit Single- bzw. Multitouch-Geräten gemacht(z.B. Smartphone, Tablet PC, neues MacBook etc.)?
 - ja
 - nein
- ▶ Wenn ja, wie häufig benutzen Sie ein solches Gerät?
 - nie
 - selten
 - gelegentlich
 - oft
 - sehr oft

C. Schwierigkeit und Effizienz von Rotation und Translation

1. Wie schwer waren die Aufgaben?
 - sehr leicht
 - leicht
 - schwer
 - sehr schwer
2. Hat sich diese Einschätzung im Laufe der Versuchsreihen geändert?
 - ja
 - nein
3. Wenn ja in welche Richtung?
 - eher schwerer
 - eher leichter

4. Wie würden Sie Ihren Lerneffekt bei den Aufgaben beschreiben?

5. Macht Ihnen die Arbeit mit dem Multitouch Spaß?
 - ja
 - nein
6. Hat sich der „Spaßfaktor“ im Laufe der Sitzungen verändert?
 - ja
 - nein
7. Wenn ja, inwiefern?

8. Hatten Sie bei irgendeiner Aufgabe Probleme?

8. Ist Ihnen etwas bei den einzelnen Aufgaben aufgefallen?

9. Haben Sie sonstige Verbesserungsvorschläge für das Experiment?

10. Fandest Du die Aufgaben anstrengend?

- kaum
- wenig
- etwas
- sehr

11. Wie würdest Du die Aufgaben nach Anstrengung und Müdigkeit sortieren (Höchste zuerst)

RR=Translation->Rechts, Rotation->Rechts, **RL, LR, LL**

Reihenfolge	Schwierigsten	Müdigkeit
1. (höchste)		
2.		
3.		
4. (niedrigste)		

ANHANG **D** 

**Performanz und Ergonomie von
Translation**

Versuchspersonen-Fragebogen

VP-Nummer: _____

1. Alter: _____
2. Geschlecht: männlich weiblich
3. Beruf/Studienfach: _____
4. Händigkeit: rechts links
5. Besitzt Du eines der aufgelisteten Touchgeräte und wie oft verwendest Du es?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nie	Selten	Gelegentlich	Oft	Immer
<i>= jährlich oder weniger</i>		<i>= unregelmäßig, alle paar Monate</i>		<i>= regelmäßig, mehrmals täglich</i>
			<i>= regelmäßig, mehrmals in der Woche</i>	

Gerät	Benutzung				
Smartphone	<input type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Gelegentlich	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Immer
Tablet	<input type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Gelegentlich	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Immer
Monitor mit Touchfunktion	<input type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Gelegentlich	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Immer
Sonstige Geräte mit Touchfunktion (iPod, Fernbedienungen, SmartWatches), bitte angeben welches: _____ _____	<input type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Gelegentlich	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Immer

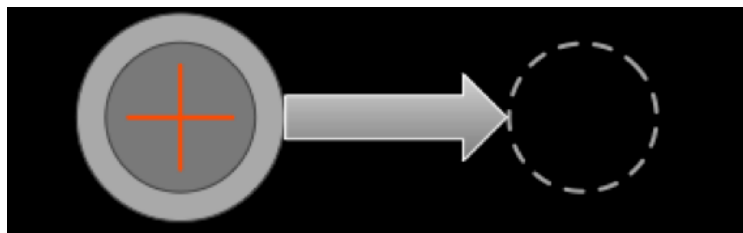
Multitouch-Studie

Instruktionen

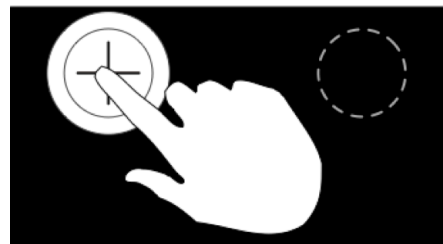


Herzlich willkommen & vielen Dank für Deine Teilnahme!

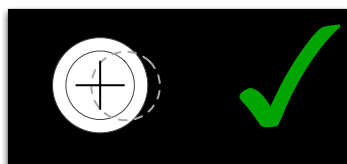
Im Folgenden ist es Deine Aufgabe, ein Objekt in einen vorgegebenen Zielbereich zu bewegen, d.h. die **graue Kreisfläche auf die** durch die gestrichelte Linie **gekennzeichnete Kreisfläche zu ziehen**.



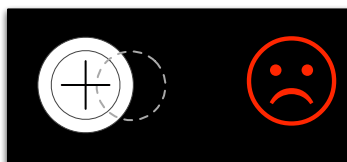
Wenn die graue Kreisfläche "berührt" wird, signalisiert der Farbwechsel von grau auf weiß, dass die Berührung erkannt und das Objekt bewegt werden kann. Ein Durchgang ist abgeschlossen, sobald Dein Finger die Multitouchoberfläche verlässt. Eine nachträgliche Korrektur ist nicht mehr möglich.



Erfolg definiert sich dadurch, dass das in der Kreisfläche liegende **Fadenkreuz im Zielbereich** (= gestrichelt umrandete Kreisfläche) liegt. Eine vollständige Deckung der beiden Kreisflächen ist deshalb nicht erforderlich.



Ein Durchgang ist **erfolgreich**, wenn sich die Mitte des Fadenkreuzes bei Messungsende innerhalb des Zielbereiches befindet.



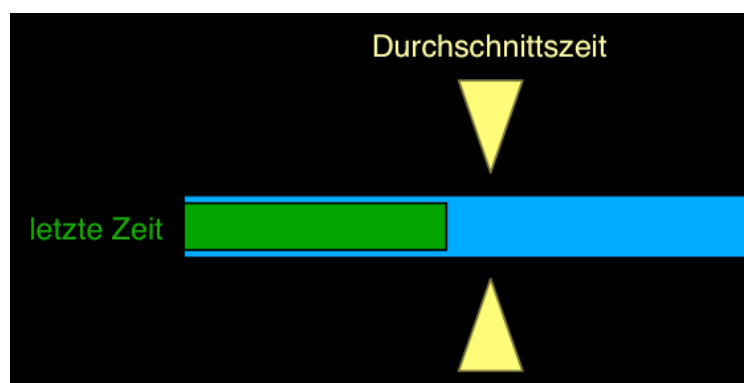
Ein Durchgang ist **gescheitert**, wenn sich die Mitte des Fadenkreuzes bei Messungsende außerhalb des Zielbereiches befindet.

Multitouch-Studie

Instruktionen

Solltest Du einen **Durchgang unbeabsichtigt abgebrochen** haben (z.B. weil Dein Finger abgerutscht ist oder der Kontakt verloren ging), **unterbrich** die Aufgabe **und melde** es **direkt** dem Versuchsleiter. Fahre erst fort, wenn der Versuchsleiter Dich dazu auffordert.

Unmittelbar nach jedem Durchgang erhältst Du ein visuelles Feedback. Eine Abbildung zeigt Dir die Zeit, die Du für den letzten Durchgang benötigt hast und wie er im Vergleich zu Deiner individuellen Durchschnittszeit einzuordnen ist.



Beachte bei der Durchführung dieser Aufgabe Folgendes:

- Setze Dich **mittig** vor das Display.
- Nimm eine **bequeme und natürliche Haltung** ein - so wie Du vor einem Display arbeiten würdest.
- Arbeite **ausschließlich** mit dem **Zeigefinger Deiner dominanten** (rechten) **Hand** - Du darfst weder Hand noch Finger während dieser Aufgabe wechseln!
- Arbeite **so schnell wie möglich** und versuche dabei **so wenig Fehler wie möglich** zu machen (max. Geschwindigkeit & Genauigkeit).
- Versuche **jede Bewegung vollständig auszuführen, nachdem Du dazu angesetzt hast** - selbst wenn sich die Kreisfläche nicht wie erwartet mitbewegen sollte (möglich aufgrund verzögerter Darstellung).
- Versuche **durchgehend zu arbeiten** und Dich **nur in den Pausen** zwischen den Versuchsblöcken „**auszurufen**“.

Hast Du noch Fragen? Dann steht Dir der Versuchsleiter gerne zur Verfügung!

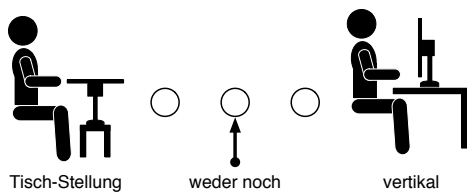
Danke für Deine Aufmerksamkeit und nun geht's los!

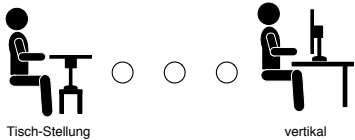
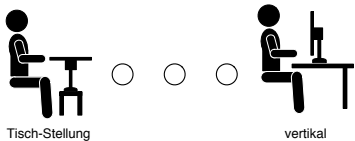
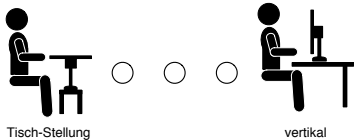
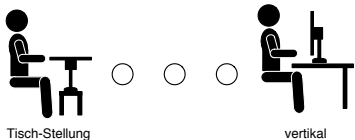
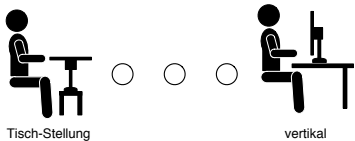
Viel Spaß!

Multitouch-Studie - Fragebogen

Hat das Experiment...	<input type="radio"/> Dir Spaß gemacht?
War das Experiment...	<input type="radio"/> anstrengend? <input type="radio"/> eintönig? <input type="radio"/> zu lange (bzw. zu viele Trials)?


Gib bei den folgenden Fragen bitte an, welche Bildschirmstellung (Tisch-Stellung oder vertikal) Du bevorzugst.



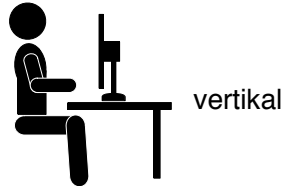
Welche der beiden Bildschirmstellungen ...	
1	... ermöglichte schneller einen sicheren Umgang? 
2	... war einfacher zu handhaben (im Sinne reiner Bedienbarkeit)? 
3	... war müheloser zu bedienen (im Sinne von geringerem Aufwand bei der Aufgabebearbeitung)? 
4	... ermöglichte ein besseres Korrigieren von Fehlern (z.B. beim Nachjustieren wegen Verfehlen des Ziels)? 
5	Mit welcher Bildschirmstellung hattest Du das Gefühl schneller arbeiten zu können? 

6	<p>Hattest Du bei einer der Bildschirmstellungen mehr Probleme als bei der anderen? Wenn ja, welche?</p> <hr/> <hr/> <hr/>
7	<p>Gab es Unterschiede in der Bedienung bzw. Ausführung der Aufgabe zwischen den Bildschirmstellungen? Wenn ja, welche?</p> <hr/> <hr/> <hr/>
8	<p>Gab es in der Ausführung der einzelnen Konfigurationen (lang, kurz, diagonal, vertikal usw.) Unterschiede zwischen den Bildschirmstellungen? Wenn ja, welche?</p> <hr/> <hr/> <hr/>

D. Performanz und Ergonomie von Translation

<p>Die folgenden Aussagen beziehen sich alle auf die Tisch-Stellung.</p> <p>Gib an, inwiefern Du der jeweiligen Aussage zustimmen würdest und nenne anschließend Deine Begründung.</p>						
1	<p>Ich würde die Tisch-Stellung für diese und ähnliche Aufgaben empfehlen.</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<p>Stimme voll und ganz zu</p> <p>Stimme eher zu</p> <p>Teils, teils</p> <p>Stimme eher nicht zu</p> <p>Stimme gar nicht zu</p>	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>				
2	<p>Mir machte das Arbeiten mit der Tisch-Stellung Spaß.</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<p>Stimme voll und ganz zu</p> <p>Stimme eher zu</p> <p>Teils, teils</p> <p>Stimme eher nicht zu</p> <p>Stimme gar nicht zu</p>	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>				
3	<p>Ich finde das Arbeiten mit der Tisch-Stellung besser als das Arbeiten mit der vertikalen Stellung.</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<p>Stimme voll und ganz zu</p> <p>Stimme eher zu</p> <p>Teils, teils</p> <p>Stimme eher nicht zu</p> <p>Stimme gar nicht zu</p>	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>				

4	Das Arbeiten mit der Tisch-Stellung empfand ich als anstrengend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Stimme voll und ganz zu	Stimme eher zu	Teils, teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu
5	Ich würde die Tisch-Stellung für die alltägliche Arbeit bevorzugen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Stimme voll und ganz zu	Stimme eher zu	Teils, teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu
6	Hast Du noch weitere Anmerkungen in Bezug auf die Tisch-Stellung?					

<p>Die folgenden Aussagen beziehen sich alle auf die vertikale Stellung.</p> <p>Gib an, inwiefern Du der jeweiligen Aussage zustimmen würdest und nenne anschließend Deine Begründung.</p>		
1	<p>Ich würde die vertikale Stellung für diese und ähnliche Aufgaben empfehlen.</p>	<input type="checkbox"/> Stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> Stimme eher zu <input type="checkbox"/> Teils, teils <input type="checkbox"/> Stimme eher nicht zu <input type="checkbox"/> Stimme gar nicht zu
	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	
2	<p>Mir machte das Arbeiten mit der vertikalen Stellung Spaß.</p>	<input type="checkbox"/> Stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> Stimme eher zu <input type="checkbox"/> Teils, teils <input type="checkbox"/> Stimme eher nicht zu <input type="checkbox"/> Stimme gar nicht zu
	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	
3	<p>Ich finde das Arbeiten mit der vertikalen Stellung besser als das Arbeiten mit der Tisch-Stellung.</p>	<input type="checkbox"/> Stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> Stimme eher zu <input type="checkbox"/> Teils, teils <input type="checkbox"/> Stimme eher nicht zu <input type="checkbox"/> Stimme gar nicht zu
	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	

4	Das Arbeiten mit der vertikalen Stellung empfand ich als anstrengend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Stimme voll und ganz zu	Stimme eher zu	Teils, teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu
5	Ich würde die vertikale Stellung für die alltägliche Arbeit bevorzugen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Stimme voll und ganz zu	Stimme eher zu	Teils, teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu
6	Hast Du noch weitere Anmerkungen in Bezug auf die vertikale Stellung?					

Wir bedanken uns herzlich für Deine Teilnahme,
Deine Geduld & Aufmerksamkeit!